

Werkstattbericht #4:

Head-Mounted Displays:

Messung räumlicher Präzision bei VR-Trackingsystemen

Stand: v04. 28.07.2020

Gefördert von



Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT,
ARBEIT UND WOHNUNGSBAU

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung - Aufgabenstellung.....	3
2. Messaufbau	4
3. Messverfahren.....	6
4. Messergebnisse	7
5. Schlussfolgerungen.....	13
6. Messprotokoll.....	14
7. Referenzen	17
8. Impressum.....	17
9. Förderhinweis.....	17

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 01: 3D-Kopfmodell	4
Abbildung 02: Verschiedene Adapter für den Roboterarm	4
Abbildung 03: Motion Controller mit Adapter am Roboterarm angebracht	4
Abbildung 04: 3D-Kopfmodell mit HMD angebracht an der Halterung	4
Abbildung 05: Software VDC HMDtools	5
Abbildung 06: Messaufbau Positionsgenauigkeit	5
Abbildung 07: Maximale Abweichung Position 1 zu 1	7
Abbildung 08: Maximale Abweichung Position 2 zu 2	7
Abbildung 09: Mittelwert aller Abweichungen Position 1 zu 1.....	8
Abbildung 10: Mittelwert aller Abweichungen Position 2 zu 2.....	8
Abbildung 11: Standardabweichung Position 1 zu 1.....	9
Abbildung 12: Standardabweichung Position 2 zu 2.....	9
Abbildung 13: Abweichungen an Position 1 aller Trackingsysteme für die X-Achse	10
Abbildung 14: Abweichungen an Position 2 aller Trackingsysteme für die X-Achse	10
Abbildung 15: Abweichungen an Position 1 aller Trackingsysteme für die Y-Achse	11
Abbildung 16: Abweichungen an Position 2 aller Trackingsysteme für die Y-Achse	11
Abbildung 17: Abweichungen an Position 1 aller Trackingsysteme für die Z-Achse.....	12
Abbildung 18: Abweichungen an Position 2 aller Trackingsysteme für die Z-Achse.....	12
Abbildung 19: Messprotokoll 01 + 02	14
Abbildung 20: Messprotokoll 03 + 04	15
Abbildung 21: Messprotokoll 05 + 06	16

1. Einführung - Aufgabenstellung

Hintergrund

Head-Mounted Displays (HMDs/Headsets, zu Deutsch "Datenhelme"), haben in den letzten Jahren einen kommerziellen Siegeszug, vor allem in Konsumenten Anwendungen, hinter sich. HMDs sind seit Jahrzehnten als grundsätzlich interessante Interaktionsgeräte bekannt. Mit geringem Geld- und Platzbedarf lässt sich ein sehr hohes Gefühl der virtuellen Präsenz erzeugen, da HMDs den Benutzer optisch isolieren (ähnlich wie geschlossene Kopfhörer akustisch isolieren). Technisch und preislich interessant wurden HMDs für eine sehr große Anzahl an Nutzern jedoch erst, nachdem kostengünstige und gleichzeitig sehr leistungsfähige Displays aus der Smartphone Produktion zur Verfügung standen.

Die Akzeptanz von Interaktionstechnik ist ein wichtiger Faktor für eine erfolgreiche Implementierung von Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR), Mixed Reality (MR), im Folgenden kurz XR genannt. Weiterhin spielt die gute Benutzbarkeit eine wichtige Rolle bei der Erzeugung Virtueller Präsenz, also dem Gefühl, in einer Virtuellen Umgebung anwesend zu sein.

Problemstellung

Inzwischen gibt es eine Vielzahl von HMDs auf dem Markt, die unterschiedliche Einsatzgebiete abdecken und dabei auf verschiedene Trackinglösungen setzen. Hervorzuheben sind dabei die Inside-out-Trackingsysteme, Systeme mit externen Sensoren aber auch kamerabasierende Systeme, die zum Tracken von HMDs oder den Eingabegeräten wie Motion Controllern verwendet werden. Aufgrund der Fülle an Technologien, die zum Einsatz kommen, ergeben sich auch unterschiedliche Performanceleistungen, aus denen man die passenden Einsatzgebiete für die jeweiligen Technologien ableiten kann.

Zielsetzung

Das Ziel der Untersuchung ist es, die Trackingsysteme anhand von verschiedenen Kriterien zu bewerten und miteinander zu vergleichen. Dazu gehört die Positionsgenauigkeit bzw. Wiederholgenauigkeit im Raum, die Latenz bzw. Reaktionsgenauigkeit der verwendeten Eingabegeräte, das Trackingvolumen im Raum und die Okklusion bzw. Neupositionierung und Erkennung der Eingabegeräte durch das Trackingsystem. In diesem Bericht wird die Positionsgenauigkeit näher betrachtet. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen kann die optimale Technologie für das gewünschte Einsatzgebiet zielgerichtet ausgewählt werden.

2. Messaufbau

Der Messaufbau besteht aus einem standardisierten 3D-Kopfmodell (s. Abbildung 01), das mit Hilfe von FreeCAD erstellt und mit einem Ultimaker S5 3D-Drucker unter Verwendung von PLA Filament gedruckt wurde. Das Kopfmodell wurde mit verschiedenen Einbuchtungen und Befestigungsmöglichkeiten für Kameras an Stelle der Augen versehen, um die menschliche Sicht durch das HMD nachzustellen. Zusätzlich zum Kopfmodell wurden für alle verwendeten Motion Controller mithilfe von FreeCAD passgenaue Adapter erstellt, mit denen diese dann am Roboterarm XArm5 Lite (s. Abbildung 03) angebracht werden können.



Abbildung 01: 3D-Kopfmodell

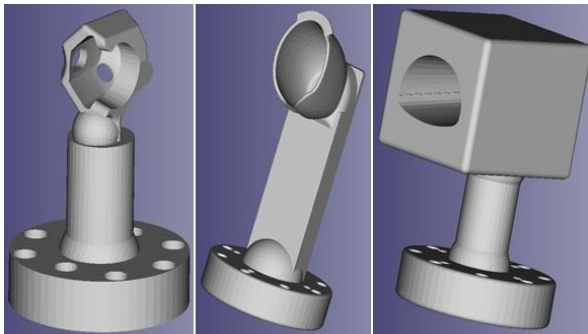


Abbildung 02: Verschiedene Adapter für den Roboterarm



Abbildung 03: Motion Controller mit Adapter am Roboterarm angebracht

Die Adapter wurden so gestaltet, dass sie die Motion Controller spielfrei aufnehmen (s. Abbildung 02) und keine der für das Tracking erforderlichen Sensoren, Marker oder Beleuchtungen verdecken.

Das Kopfmodell wird auf einer Halterung fixiert (s. Abbildung 04) und an einem vorher festgelegten Punkt mit einem aufgesetzten HMD positioniert (s. Abbildung 06). Dadurch wurde ein direktes und freies Sichtfeld zwischen HMD und Motion Controller sichergestellt, was gerade bei den Inside-out-Trackingsystemen wichtig ist. Die HMDs wurden entsprechend den Gebrauchsanweisungen für die optimale Benutzung von HMDs auf dem 3D-Kopfmodell positioniert.



Abbildung 04: 3D-Kopfmodell mit HMD angebracht an der Halterung

Als Hilfsmittel und zur Vorbereitung für die Messungen, wurde zusätzlich eine Software (VDC HMDtools, s. Abbildung 05) zum Auslesen, Abspeichern und zur Visualisierung der Positionen in X, Y und Z erstellt. Die Software stellt sicher, dass alle Messungen identisch durchgeführt werden und übernimmt zudem auch die Aufzeichnung der Positionen in X, Y und Z. Um eine spätere Auswertung zu ermöglichen, wurden alle erfassten Messwerte von der Software in ein Excel-Arbeitsblatt übertragen.

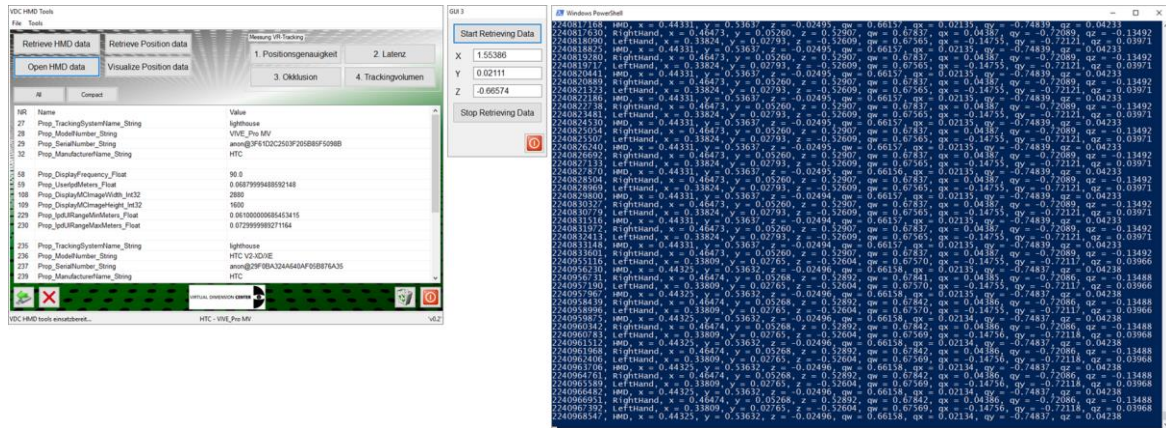


Abbildung 05: Software VDC HMDtools

Für die Messung wurden zwei Punkte mit einer Entfernung von 500 mm zueinander festgelegt (s. Abbildung 06). Diese Punkte wurden jeweils 50 Mal nacheinander angefahren und bei jedem Punkt wurden die Positionen in X, Y und Z abgespeichert. Der Roboterarm XArm5 Lite wurde an einer Kante mittig auf einem Tisch fixiert und über eine LAN-Verbindung mit dem Laptop verbunden. Die bereits erwähnte Software VDC HMDtools übernimmt ebenfalls die Steuerung des Roboters, dazu wird die API Schnittstelle und ein Python-Skript genutzt, das die geradlinige Bewegung des Roboterarms ausführt.

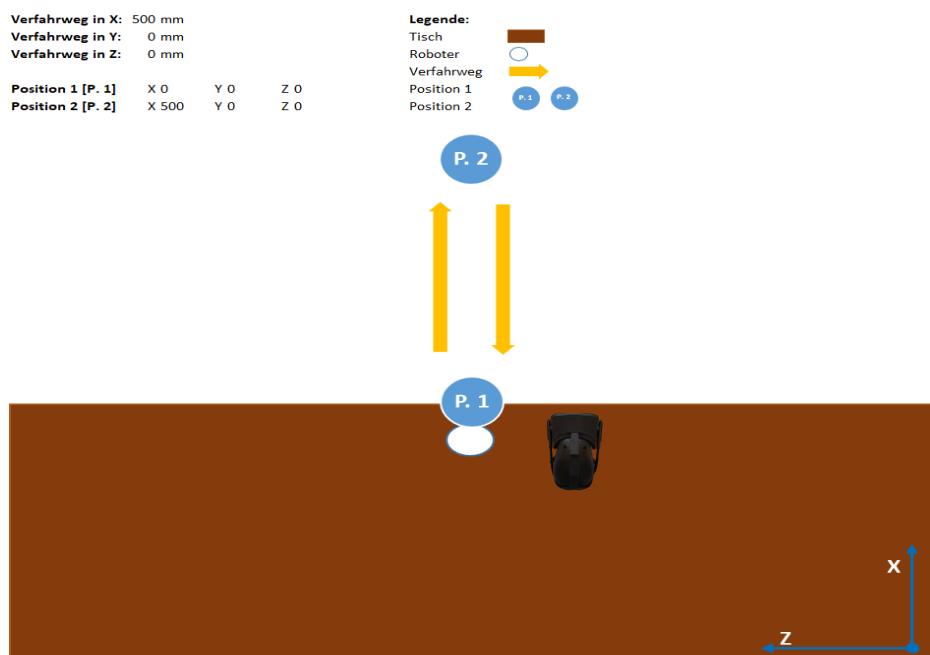


Abbildung 06: Messaufbau Positionsgenauigkeit

3. Messverfahren

Folgendes Messverfahren wurde für diese Messreihe angewendet:

1. Strecke bzw. Abstand zwischen Punkt 1 und Punkt 2 beträgt in X 500 mm.
2. Das zu testende HMD bzw. das HMD zum jeweiligen Trackingsystem wird auf eine eigens angefertigte Halterung an der Tischkante mit direktem und freiem Sichtfeld zu den Motion Controllern angebracht.
3. Die Adapter für die gewünschten Motion Controller wurden am Roboter xArm5 Lite angebracht.
4. Es wurden für den Roboter xArm5 Lite zwei geradlinige Bewegungen in X programmiert. Die vorgesehene Strecke beträgt 500 mm.
5. Die eingestellte Beschleunigung des Roboters beträgt 1145 mm/s^2 und die Geschwindigkeit beträgt 35 mm/s . Messungen erfolgen jedoch im Stillstand.
6. Nach Erreichen der Position werden 3 Sekunden Pause eingehalten, erst nach den 3 Sekunden Pause werden die Messwerte ausgelesen und abgespeichert.
7. Mit dem Programm VDC HMDtools wird der Roboter angesteuert und es werden auch die Werte bei Erreichen jeder Position in X, Y und Z in einem Excel-Arbeitsblatt aufgezeichnet. Das Programm VDC HMDtools verwendet eine modifizierte Variante des OpenVR SDKs [1].
8. Die Positionen der Motion Controller im Raum werden über OpenVR ermittelt.
9. Die geradlinige Bewegung bzw. das Anfahren eines Punktes wird 50 Mal wiederholt.
10. Dieser Ablauf ist für alle Trackingsysteme identisch.
11. Auswertung: Mit den aufgezeichneten Positionen in X, Y und Z kann die Abweichung im Koordinatensystem nach jedem Anfahren eines Punktes ermittelt werden.
12. Die Auswertung und Gegenüberstellung der Werte erfolgt in MS Excel.

4. Messergebnisse

Mit den aufgezeichneten Daten konnten verschiedene Auswertungen vorgenommen werden. Neben der maximalen Abweichung wurden auch der Mittelwert und die Standardabweichung der verschiedenen Trackingsysteme miteinander verglichen.

Maximale Abweichung:

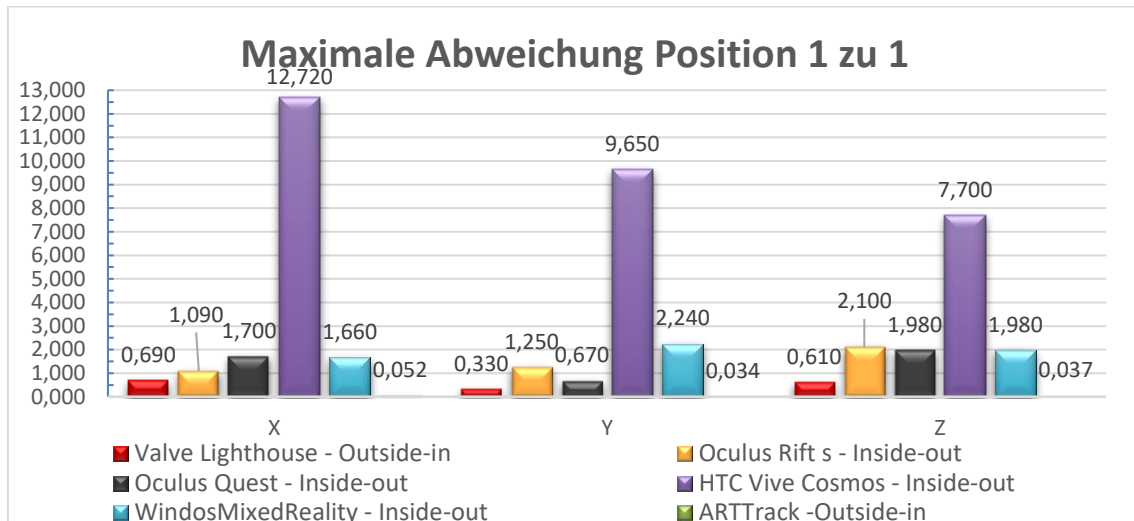


Abbildung 07: Maximale Abweichung Position 1 zu 1

Hierbei handelt es sich um die größte ermittelte Abweichung nach dem erneuten Anfahren eines Punktes aus 50 Messwerten. Zur Ermittlung der maximalen Abweichung (s. Abbildung 07 + 08) wurden die direkt aufeinanderfolgenden Messwerte ausgewertet. Die Abweichung wird in mm angegeben und die Skalierung richtet sich nach dem Trackingsystem mit der größten Abweichung. Dies führt dazu, dass die Trackingsysteme mit sehr guten Werten kleiner 1 mm wie das Valve Lighthouse Tracking (in Rot ganz links dargestellt) oder auch das ART-Trackingsystem (in Grün ganz rechts dargestellt) im Diagramm kaum sichtbar sind. Beim Vergleich fällt auch auf, dass die Inside-Out-Trackingsysteme an Position 2 (s. Abbildung 08) größere Abweichungen aufweisen, wohingegen die Outside-In-Trackingsysteme konstant bleiben.

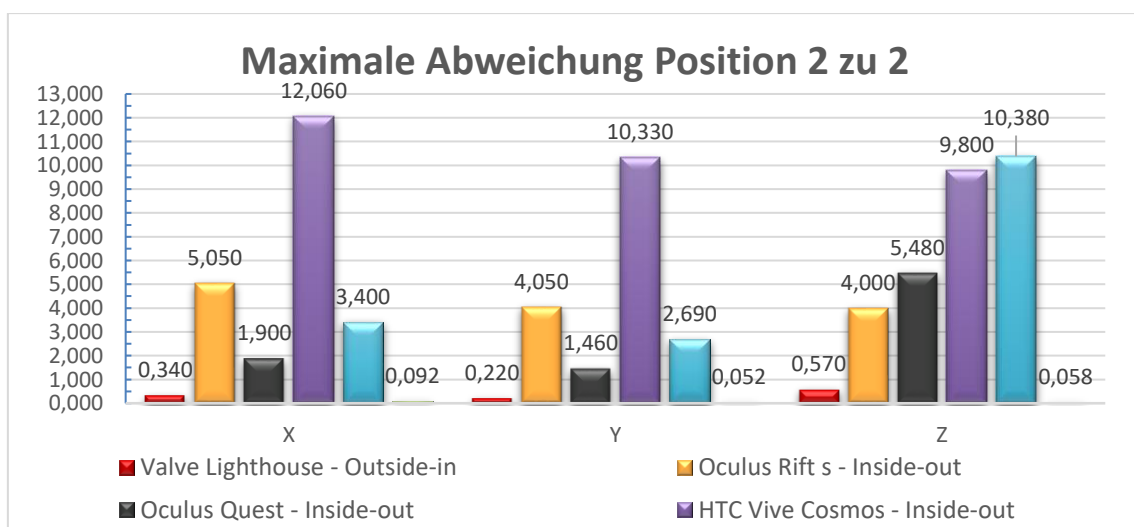


Abbildung 08: Maximale Abweichung Position 2 zu 2

Mittelwert aller Abweichungen

Die folgende Abbildung stellt die durchschnittliche absolute Abweichung zu ihrem Mittelwert dar. Es fällt auf, dass mit Ausnahme eines Trackingsystems die Werte an Position 1 (s. Abbildung 09) nicht zu stark voneinander abweichen und unter 0,50 mm liegen.

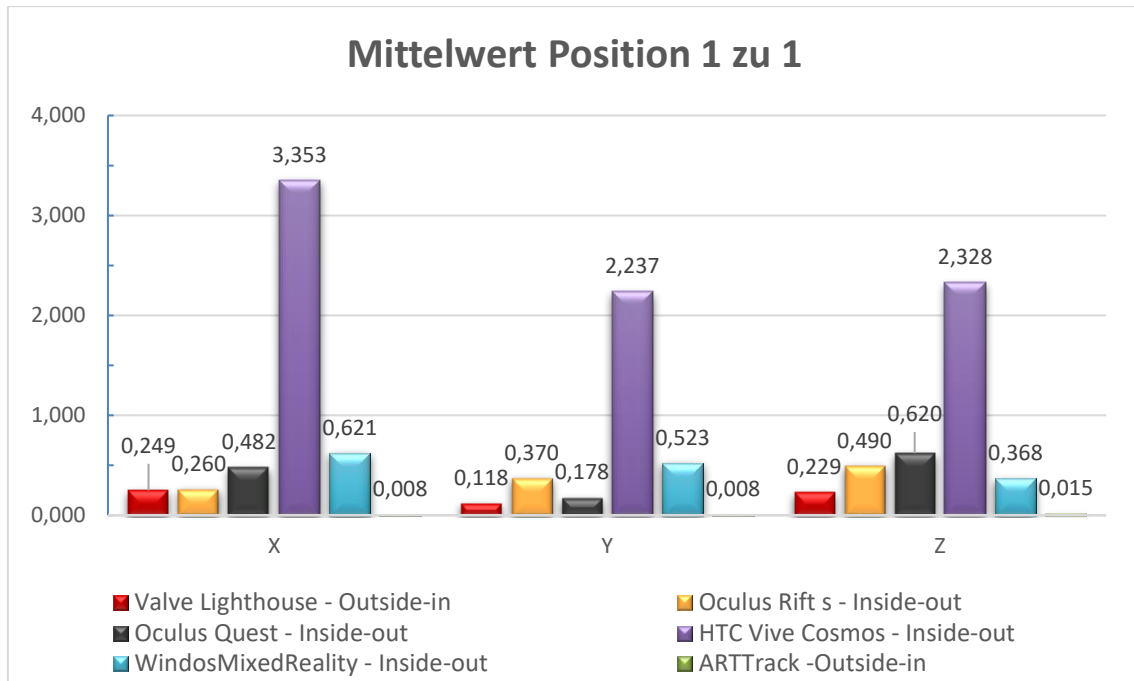


Abbildung 09: Mittelwert aller Abweichungen Position 1 zu 1

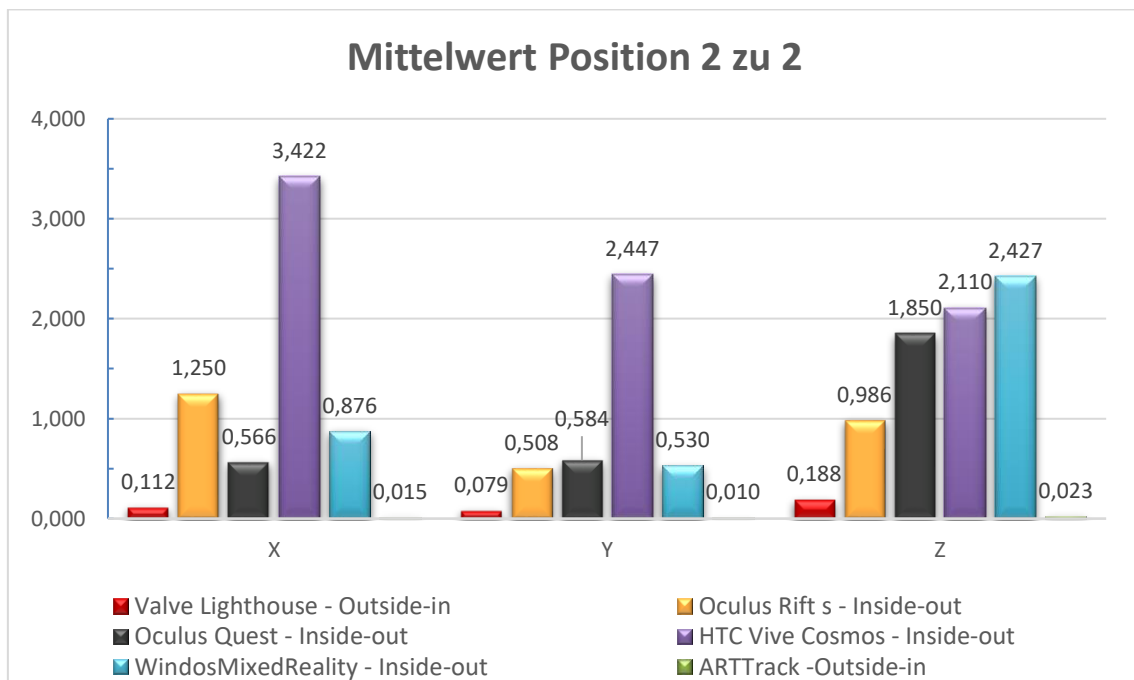


Abbildung 10: Mittelwert aller Abweichungen Position 2 zu 2

Auch bei der Mittelabweichung ist ein Unterschied zwischen Position 1 und Position 2 erkennbar, die Inside-Out-Trackingsysteme weisen an Position 2 (s. Abbildung 10) eine größere Abweichung gegenüber den Outside-In-Trackingsysteme auf.

Standardabweichung

Zusätzlich zu den zwei bereits dargestellten Auswertungen wurde ebenfalls die Standardabweichung (s. Abbildung 11 + 12) ermittelt.

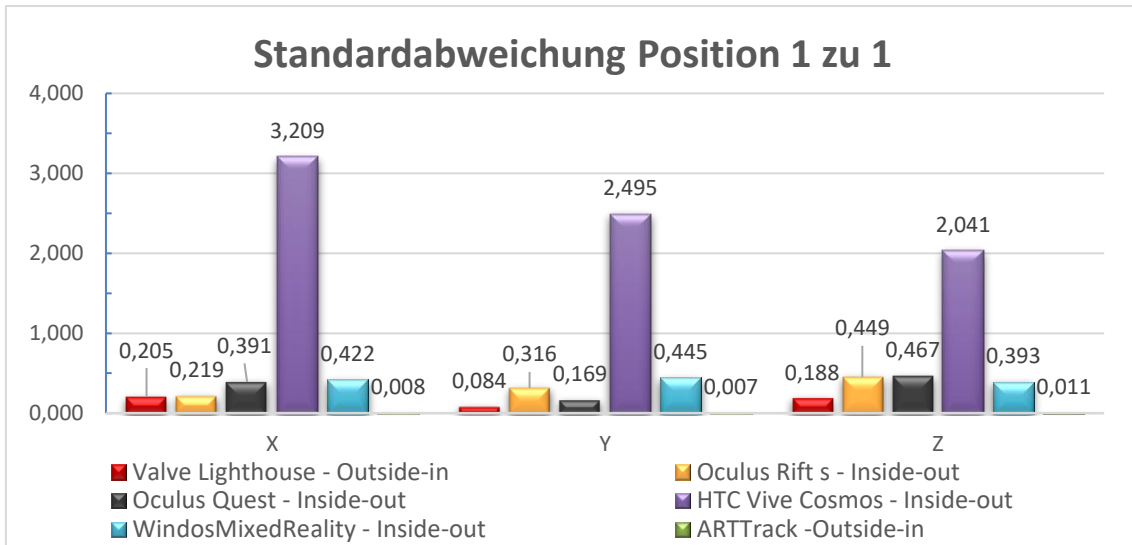


Abbildung 11: Standardabweichung Position 1 zu 1

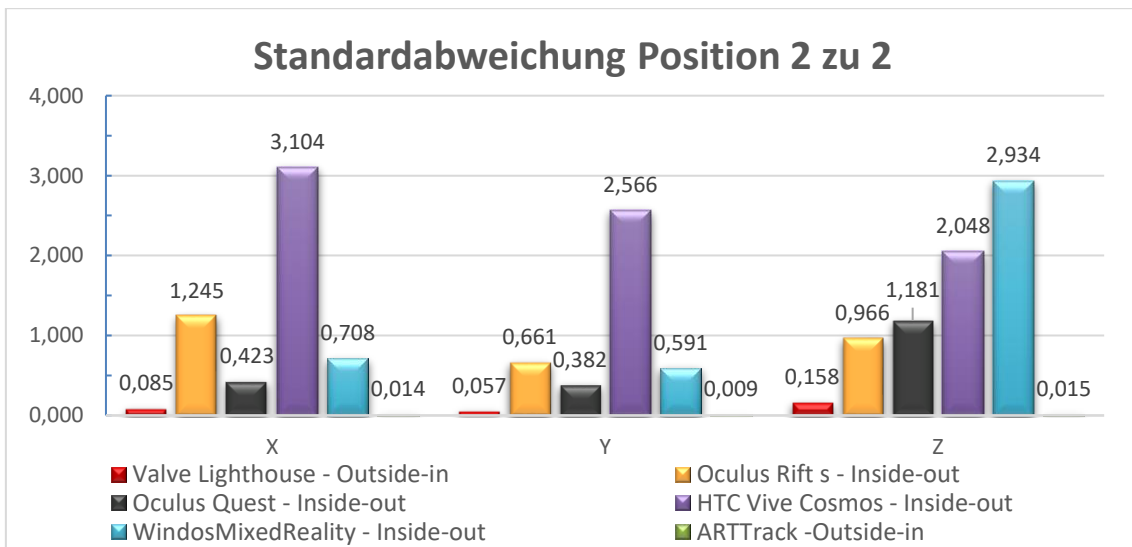


Abbildung 12: Standardabweichung Position 2 zu 2

Es zeigt sich auch bei der Standardabweichung, dass die Position 2 (s. Abbildung 12) zumindest bei den Inside-Out-Trackingsystemen größer ist.

Die nachfolgenden Abbildungen stellen alle erfassten Messwerte für die Position 1 und Position 2 der überprüften Trackingsysteme für die X-Achse dar.

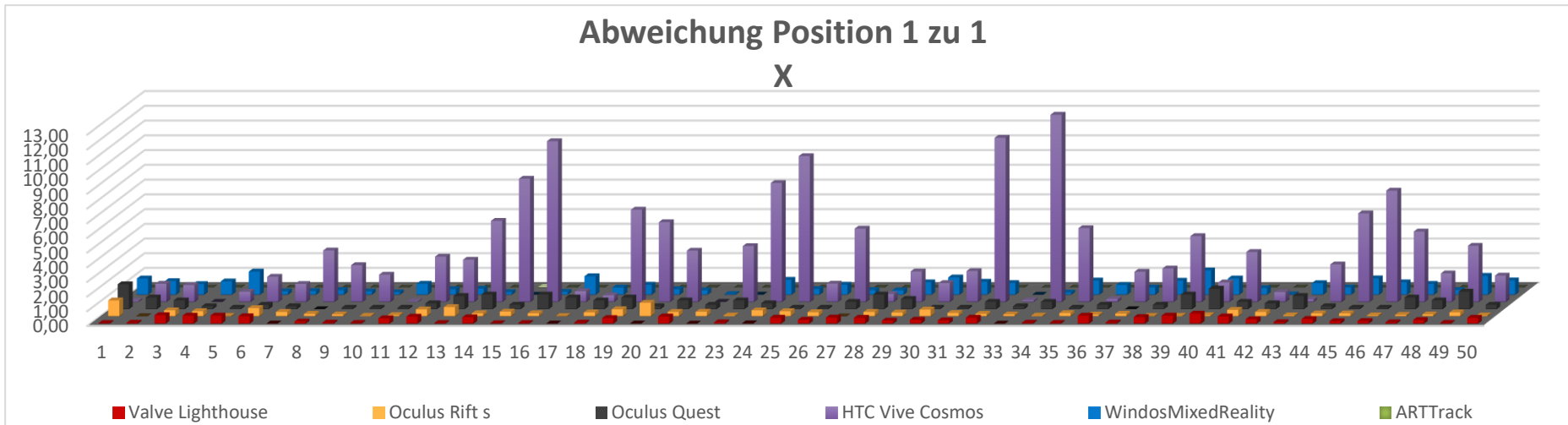


Abbildung 13: Abweichungen an Position 1 aller Trackingsysteme für die X-Achse

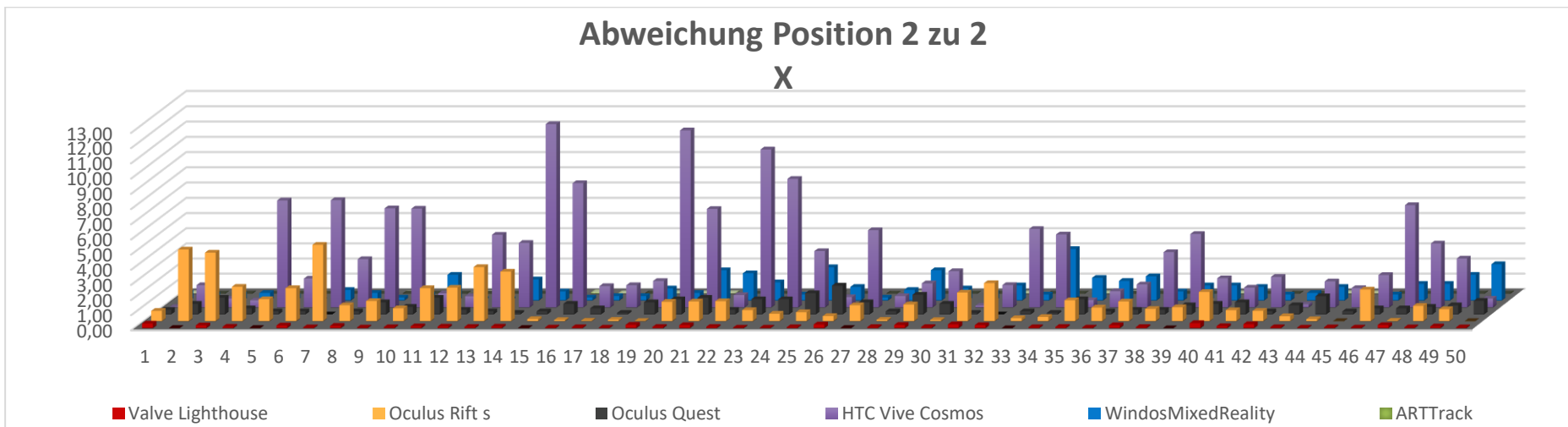


Abbildung 14: Abweichungen an Position 2 aller Trackingsysteme für die X-Achse

Die nachfolgenden Abbildungen stellen alle erfassten Messwerte für die Position 1 und Position 2 der überprüften Trackingsysteme für die Y-Achse dar.

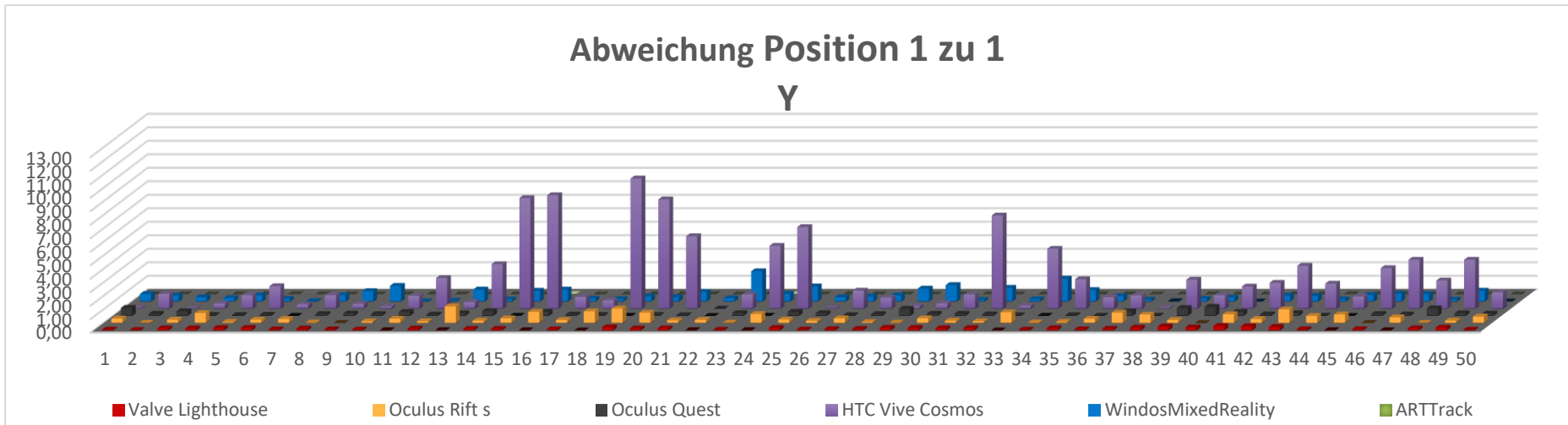


Abbildung 15: Abweichungen an Position 1 aller Trackingsysteme für die Y-Achse

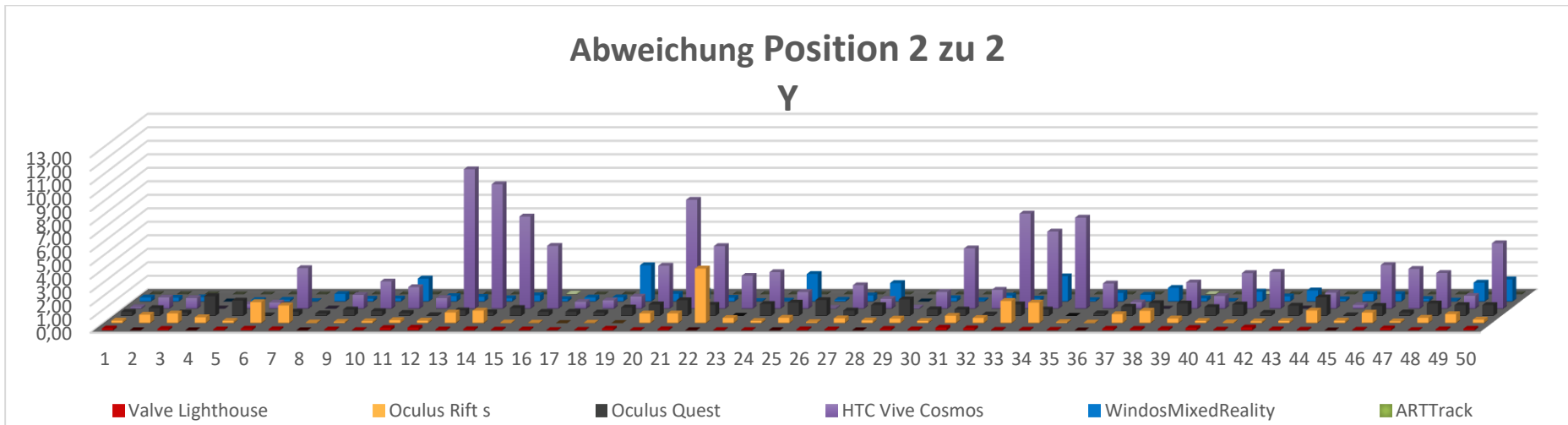


Abbildung 16: Abweichungen an Position 2 aller Trackingsysteme für die Y-Achse

Die nachfolgenden Abbildungen stellen alle erfassten Messwerte für die Position 1 und Position 2 der überprüften Trackingsysteme für die Z-Achse dar.

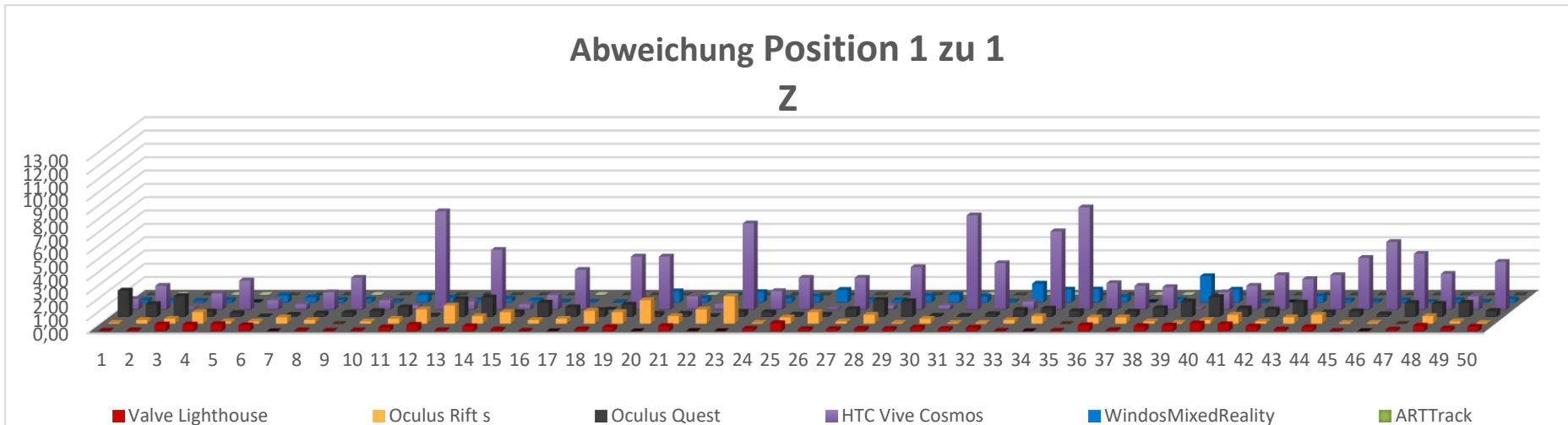


Abbildung 17: Abweichungen an Position 1 aller Trackingsysteme für die Z-Achse

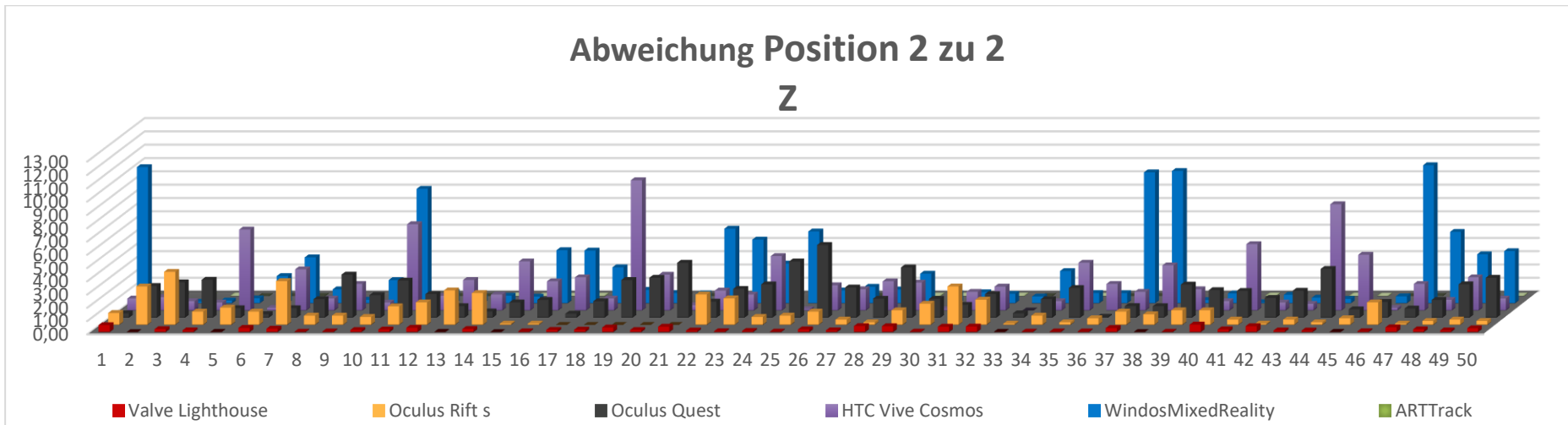


Abbildung 18: Abweichungen an Position 2 aller Trackingsysteme für die Z-Achse

5. Schlussfolgerungen

Nach Auswertung aller 50 Messwerte für beide Positionen fällt auf, dass deutliche Unterschiede bei der Genauigkeit der getesteten Trackingsysteme vorliegen. Wie zu erwarten, sticht das ART-Trackingsystem und das Valve Lighthouse mit einer Genauigkeit im Sub-Millimeter-Bereich hervor. Im Gegensatz zu den kamerabasierten Inside-out-Trackingsystemen trifft dies auf beide Positionen zu. Das ART-Trackingsystem hat sich dabei als das genaueste erwiesen. Hier lag jede ermittelte Abweichung unter 0,1 mm und ist daher in den Diagrammen kaum darstell- bzw. erkennbar. Die Genauigkeit des Valve Lighthouse Trackingsystems liegt ebenfalls im Sub-Millimeter-Bereich und die größte Abweichung wurde mit 0,69 mm erfasst. Auch hier ist zwischen den Messwerten beider Positionen kein Unterschied erkennbar. Die Inside-out-Trackingsysteme wie die Oculus Rift S, Oculus Quest, die Windows Mixed Reality HMDs oder auch die HTC Vive Cosmos hingegen zeigen bei der Position 2 eine größere Abweichung gegenüber den Messwerten aus Position 1. Das könnte sich dadurch erklären lassen, dass die Position 2 bezogen auf die Position des HMDs und somit der Kameras weiter entfernt ist. Es lassen sich jedoch auch Unterschiede zwischen den Inside-out-Trackingsystemen erkennen. Die HTC Vive Cosmos schneidet hier mit Abweichungen, die teilweise über 5 mm liegen, am schlechtesten ab. Dies lässt sich womöglich auf die Unterschiede bei den verwendeten Hardwarekomponenten und unterschiedlicher Software zurückführen. Bei der HTC Vive Cosmos war es möglich, die Abweichung auch visuell während der Durchführung der Messung zu beobachten, bei Erreichen eines jeden Punktes lässt sich ein „Positionsdrift“ der Motion Controller bzw. deren Darstellung im virtuellen Raum deutlich erkennen.

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass es bei der Positionsgenauigkeit der Trackingsysteme Unterschiede gibt. Je nach Anwendungsfall sollten diese Unterschiede bei der Auswahl der richtigen Hardware berücksichtigt werden. Eine höhere Genauigkeit kann auch eine komplexere Handhabung und Installation zur Folge haben. Bei den Outside-In-Trackingsystemen mit einer höheren Genauigkeit gegenüber den Inside-Out Trackingsystemen müssen z.B. externe Sensoren oder Kameras angebracht werden. Hier kann sich der Aufwand deutlich unterscheiden. Beispielsweise müssen beim Valve Lighthouse Trackingsystem die Lighthouse Stationen lediglich ans Stromnetz angeschlossen werden, wo hingegen das ART-Trackingsystem zusätzlich einen Controller und somit eine separate Recheneinheit zum Betrieb benötigt. Das Trackingsystem kann nur in Räumlichkeiten mit installierten Sensoren/Kameras betrieben werden.

Aus den genannten Vor- und Nachteilen ergeben sich unterschiedliche Szenarien für den optimalen Einsatz der jeweiligen Trackingsysteme. Aufgrund der hohen Genauigkeiten bieten sich das ART- und Valve Lighthouse Trackingsystem für Anwendungen mit einem hohen Präzisionsgrad an, z. B. im Bereich Design, 3D-Modellierung, Medizintechnik, Simulationen oder auch beim Einsatz von physischen Objekten, mit denen interagiert werden soll. Das HMD / Trackingsystem ist ortsgebunden und kann nur am Ort der Installation verwendet werden. Die Inside-Out-Trackingsysteme hingegen können in allen Räumlichkeiten genutzt werden und bieten sich daher für alle Einsatzgebiete an, bei denen die Flexibilität im Vordergrund steht und eine Positionsgenauigkeit von bis zu 5 mm ausreichend ist. Hierrunter fallen kollaborative VR-Anwendungen mit dem Schwerpunkt Kommunikation, Besprechungen, Schulungen und Produktpräsentationen oder auch Demonstrationen und Vorführungen ohne hohen Interaktionsanteil.

6. Messprotokoll

Die folgenden Tabellen zeigen die Messprotokolle der getesteten Trackingsysteme.

Aufzeichnung Valve Lighthouse Tracking in mm							Aufzeichnung Oculus Rift S in mm						
NR	Position 1			Position 2			NR	Position 1			Position 2		
	X	Y	Z	X	Y	Z		X	Y	Z	X	Y	Z
1	170,260	1.316,520	116,970	661,700	1.322,030	43,900	1	114,760	1.328,710	-108,100	620,250	1.326,630	-121,900
2	170,220	1.316,580	117,020	661,390	1.321,880	43,370	2	115,850	1.328,370	-108,000	619,560	1.326,820	-121,000
3	170,160	1.316,610	116,940	661,410	1.321,890	43,370	3	115,830	1.328,400	-108,300	614,820	1.326,190	-118,100
4	170,740	1.316,760	117,460	661,600	1.322,000	43,600	4	115,410	1.328,660	-107,900	619,350	1.326,910	-122,100
5	170,190	1.316,610	116,950	661,500	1.321,990	43,460	5	115,050	1.327,910	-108,800	617,070	1.327,350	-121,100
6	170,740	1.316,780	117,490	661,480	1.321,920	43,440	6	115,010	1.328,010	-109,000	615,610	1.327,530	-119,800
7	170,230	1.316,600	117,040	661,660	1.322,050	43,760	7	114,440	1.328,270	-108,800	613,420	1.325,970	-118,800
8	170,220	1.316,670	117,040	661,600	1.321,960	43,500	8	114,750	1.327,960	-109,300	618,470	1.327,280	-122,100
9	170,360	1.316,540	117,120	661,440	1.321,970	43,470	9	114,930	1.328,020	-109,000	617,410	1.327,340	-121,400
10	170,290	1.316,610	117,070	661,490	1.321,900	43,420	10	114,790	1.328,040	-109,000	618,750	1.327,440	-122,100
11	170,340	1.316,670	117,140	661,560	1.321,930	43,580	11	114,740	1.328,180	-108,800	617,890	1.327,290	-121,500
12	170,710	1.316,680	117,430	661,690	1.322,110	43,780	12	114,840	1.327,850	-108,400	620,080	1.327,060	-122,900
13	170,230	1.316,550	116,940	661,580	1.321,910	43,450	13	115,320	1.327,710	-109,500	617,860	1.327,250	-121,200
14	170,270	1.316,570	117,020	661,490	1.321,980	43,470	14	114,680	1.328,960	-108,100	614,280	1.328,040	-118,600
15	170,710	1.316,680	117,400	661,600	1.322,070	43,710	15	114,900	1.328,770	-108,700	617,560	1.327,110	-121,000
16	170,740	1.316,790	117,530	661,620	1.322,010	43,710	16	114,570	1.328,410	-109,600	617,710	1.327,050	-120,900
17	170,700	1.316,800	117,490	661,670	1.322,080	43,770	17	114,790	1.327,570	-109,900	617,620	1.327,090	-121,000
18	170,710	1.316,730	117,490	661,740	1.322,110	43,940	18	114,820	1.327,810	-109,500	617,580	1.327,100	-121,000
19	170,640	1.316,730	117,340	661,700	1.322,070	43,750	19	114,540	1.328,690	-108,500	617,680	1.327,060	-121,000
20	170,260	1.316,500	117,030	661,470	1.321,940	43,400	20	115,030	1.327,600	-109,400	617,650	1.327,070	-121,000
21	170,250	1.316,640	117,030	661,560	1.321,970	43,560	21	115,960	1.326,820	-111,200	616,360	1.326,350	-121,000
22	170,740	1.316,790	117,430	661,770	1.322,060	43,970	22	116,270	1.327,030	-111,800	617,670	1.327,070	-121,000
23	170,740	1.316,770	117,450	661,680	1.322,040	43,850	23	116,590	1.326,780	-112,900	616,340	1.323,020	-123,300
24	170,650	1.316,730	117,460	661,640	1.322,070	43,780	24	116,520	1.326,740	-110,800	617,080	1.322,630	-121,300
25	170,670	1.316,750	117,650	661,680	1.322,040	43,870	25	116,940	1.326,060	-110,900	617,580	1.322,800	-121,900
26	170,260	1.316,570	117,040	661,750	1.322,060	43,830	26	116,580	1.326,330	-111,400	616,980	1.323,200	-122,600
27	170,530	1.316,510	117,200	661,500	1.321,980	43,620	27	116,290	1.326,150	-112,300	617,330	1.323,290	-123,600
28	170,110	1.316,600	117,030	661,480	1.321,910	43,760	28	116,290	1.326,510	-112,100	618,390	1.322,930	-124,000
29	170,510	1.316,700	117,220	661,400	1.321,920	43,300	29	115,980	1.326,420	-111,400	618,290	1.322,720	-123,800
30	170,300	1.316,510	117,040	661,620	1.322,030	43,750	30	116,250	1.326,460	-111,500	617,180	1.323,060	-122,700
31	170,570	1.316,700	117,320	661,700	1.322,110	43,710	31	116,720	1.326,100	-111,900	617,090	1.323,230	-121,100
32	170,340	1.316,540	117,140	661,440	1.321,910	43,300	32	116,480	1.325,910	-111,800	618,990	1.322,680	-124,000
33	170,750	1.316,710	117,410	661,650	1.322,070	43,720	33	116,300	1.325,760	-111,900	616,470	1.323,070	-122,100
34	170,750	1.316,710	117,450	661,650	1.322,110	43,700	34	116,440	1.326,570	-111,600	616,680	1.321,420	-122,200
35	170,690	1.316,760	117,460	661,720	1.322,160	43,740	35	116,500	1.326,630	-111,000	616,390	1.322,950	-121,500
36	170,740	1.316,600	117,410	661,630	1.322,120	43,690	36	116,270	1.326,530	-111,000	615,000	1.322,860	-121,300
37	170,190	1.316,520	116,950	661,680	1.322,120	43,740	37	116,140	1.326,860	-111,500	615,910	1.322,910	-121,800
38	170,270	1.316,640	117,040	661,480	1.322,000	43,430	38	116,330	1.326,080	-112,000	614,600	1.323,580	-120,800
39	170,720	1.316,850	117,430	661,560	1.322,110	43,440	39	116,290	1.326,720	-111,800	615,420	1.322,660	-121,600
40	170,170	1.316,560	116,990	661,560	1.322,010	43,470	40	116,340	1.326,480	-111,900	614,490	1.323,010	-120,500
41	170,860	1.316,780	117,590	661,900	1.322,190	44,040	41	116,430	1.326,470	-111,600	616,430	1.322,840	-121,600
42	170,370	1.316,450	117,060	661,760	1.322,130	43,830	42	115,980	1.325,810	-110,900	615,700	1.322,910	-121,200
43	170,670	1.316,760	117,420	661,490	1.321,910	43,380	43	116,290	1.326,120	-111,100	615,010	1.323,050	-121,100
44	170,570	1.316,500	117,280	661,560	1.321,990	43,510	44	116,210	1.327,140	-110,600	614,670	1.323,220	-120,700
45	170,250	1.316,580	116,980	661,520	1.321,940	43,390	45	116,420	1.326,600	-111,300	614,810	1.322,290	-120,900
46	170,420	1.316,600	117,010	661,460	1.321,940	43,370	46	116,210	1.325,950	-111,400	614,790	1.322,480	-120,400
47	170,240	1.316,690	117,000	661,510	1.321,990	43,440	47	116,290	1.325,970	-111,300	616,890	1.323,260	-122,100
48	170,150	1.316,700	116,870	661,720	1.322,140	43,810	48	116,400	1.326,410	-111,300	616,850	1.323,120	-122,200
49	170,400	1.316,850	117,290	661,660	1.322,110	43,600	49	116,540	1.326,440	-111,900	615,830	1.322,720	-121,900
50	170,350	1.316,650	117,080	661,540	1.322,030	43,470	50	116,260	1.326,250	-111,700	616,630	1.323,390	-122,300
51	170,750	1.316,600	117,430	661,480	1.321,910	43,760	51	116,330	1.325,760	-111,600	616,650	1.323,120	-122,000

Abbildung 19: Messprotokoll 01 + 02

Aufzeichnung Oculus Quest in mm							Aufzeichnung HTC Vive Cosmos in mm						
NR	Position 1			Position 2			NR	Position 1			Position 2		
	X	Y	Z	X	Y	Z		X	Y	Z	X	Y	Z
1	-172,200	2.708,600	309,270	-341,800	2.703,600	767,420	1	967,770	1.282,360	-311,700	1.466,700	1.272,680	-325,300
2	-170,500	2.708,000	311,250	-341,500	2.703,900	767,750	2	967,680	1.282,430	-310,900	1.466,730	1.272,560	-324,400
3	-169,700	2.707,840	312,210	-342,200	2.703,320	765,360	3	966,440	1.281,330	-309,100	1.465,260	1.271,730	-323,400
4	-170,300	2.708,190	310,640	-341,100	2.703,070	768,030	4	967,590	1.281,380	-309,200	1.465,840	1.272,520	-324,100
5	-170,500	2.708,260	310,240	-341,500	2.704,530	765,170	5	967,580	1.281,000	-308,000	1.465,370	1.272,500	-324,700
6	-170,600	2.708,190	310,520	-341,300	2.703,390	765,890	6	966,880	1.282,010	-310,200	1.458,310	1.272,160	-318,600
7	-170,300	2.708,100	310,560	-341,500	2.703,430	766,160	7	965,160	1.283,680	-310,900	1.456,400	1.271,700	-318,800
8	-170,500	2.708,090	310,710	-341,500	2.703,120	766,880	8	963,930	1.283,360	-311,300	1.463,480	1.274,710	-321,900
9	-170,500	2.707,950	310,970	-341,300	2.702,930	768,280	9	967,440	1.284,370	-312,600	1.460,290	1.274,690	-322,800
10	-170,400	2.708,130	311,280	-342,100	2.703,410	765,030	10	964,930	1.284,740	-310,200	1.466,830	1.275,710	-324,800
11	-170,500	2.708,000	310,850	-342,600	2.703,770	763,330	11	966,790	1.284,900	-310,900	1.460,310	1.273,690	-325,400
12	-170,600	2.708,290	310,130	-341,500	2.703,550	766,130	12	966,850	1.283,950	-310,600	1.459,380	1.272,090	-318,900
13	-171,000	2.708,190	310,230	-341,200	2.703,490	767,910	13	969,940	1.286,220	-303,200	1.460,120	1.271,300	-317,800
14	-170,100	2.707,990	311,570	-341,000	2.703,080	768,780	14	972,820	1.286,710	-303,800	1.464,920	1.281,630	-320,100
15	-171,100	2.708,350	310,100	-341,100	2.702,810	768,310	15	967,290	1.283,410	-308,300	1.460,660	1.272,410	-318,900
16	-170,800	2.708,330	310,450	-341,300	2.703,400	767,160	16	975,680	1.291,610	-308,700	1.472,720	1.279,240	-322,600
17	-169,800	2.708,030	311,520	-342,000	2.703,700	765,820	17	964,750	1.283,200	-307,600	1.464,530	1.274,580	-324,800
18	-170,600	2.708,130	310,800	-341,600	2.704,010	766,120	18	965,480	1.284,070	-310,600	1.465,940	1.275,090	-327,300
19	-170,000	2.708,200	311,310	-341,700	2.703,760	764,880	19	965,030	1.283,450	-310,600	1.467,410	1.275,710	-326,400
20	-170,800	2.708,180	310,390	-340,900	2.703,130	767,720	20	971,320	1.293,100	-306,600	1.469,160	1.276,610	-316,600
21	-171,000	2.708,110	310,620	-341,900	2.703,990	764,710	21	965,880	1.285,000	-310,600	1.457,510	1.273,420	-319,300
22	-170,400	2.708,050	310,850	-340,800	2.702,820	768,850	22	969,380	1.290,370	-311,600	1.464,010	1.281,490	-319,700
23	-170,100	2.708,050	310,900	-341,100	2.703,650	767,640	23	969,370	1.290,370	-311,200	1.464,830	1.276,850	-318,200
24	-170,700	2.707,840	310,520	-342,100	2.703,630	765,470	24	965,560	1.289,320	-317,700	1.454,430	1.274,410	-319,400
25	-170,300	2.707,820	310,870	-341,100	2.702,740	767,980	25	973,660	1.293,980	-316,300	1.462,900	1.277,120	-323,500
26	-170,400	2.708,120	311,040	-342,500	2.703,730	763,740	26	963,740	1.287,930	-313,900	1.459,180	1.275,880	-323,400
27	-170,300	2.707,920	310,880	-340,600	2.702,550	769,220	27	964,990	1.287,980	-314,000	1.458,500	1.275,950	-321,500
28	-170,800	2.707,860	310,300	-341,400	2.702,950	766,940	28	969,990	1.289,320	-311,600	1.463,600	1.277,690	-319,900
29	-169,800	2.707,730	311,580	-341,600	2.703,760	765,510	29	969,450	1.290,140	-311,300	1.464,350	1.278,420	-317,700
30	-170,500	2.708,260	310,400	-340,300	2.702,530	769,300	30	967,370	1.290,320	-314,500	1.462,760	1.278,510	-319,800
31	-170,600	2.708,100	310,310	-341,000	2.703,020	767,880	31	966,080	1.289,930	-314,800	1.465,160	1.279,750	-319,700
32	-170,700	2.707,940	310,390	-341,100	2.703,500	766,910	32	968,190	1.288,880	-307,700	1.465,280	1.284,220	-321,100
33	-170,200	2.708,060	310,590	-341,100	2.703,390	768,690	33	979,350	1.295,790	-311,200	1.466,760	1.285,620	-322,900
34	-170,000	2.708,110	311,120	-340,900	2.702,530	769,020	34	979,230	1.296,000	-311,800	1.461,580	1.278,570	-322,900
35	-170,500	2.708,090	310,500	-341,000	2.703,010	767,620	35	966,510	1.291,560	-317,700	1.466,400	1.284,290	-322,200
36	-170,400	2.708,030	310,930	-342,000	2.703,020	765,380	36	971,540	1.289,370	-310,000	1.465,920	1.277,540	-318,600
37	-170,700	2.708,060	310,500	-341,800	2.703,210	765,450	37	971,740	1.288,520	-308,000	1.466,990	1.279,410	-320,600
38	-170,700	2.708,400	310,100	-341,500	2.703,900	766,330	38	969,680	1.289,500	-309,800	1.465,470	1.278,930	-319,200
39	-170,400	2.708,370	310,760	-341,200	2.702,950	767,200	39	971,960	1.289,570	-311,500	1.469,120	1.278,930	-322,600
40	-169,400	2.707,790	311,920	-341,800	2.703,880	764,700	40	967,470	1.287,420	-311,400	1.464,270	1.276,980	-324,200
41	-170,800	2.708,460	310,430	-341,100	2.703,220	766,780	41	966,140	1.286,420	-310,100	1.466,200	1.277,920	-324,900
42	-170,300	2.708,160	311,070	-341,900	2.704,070	764,760	42	969,550	1.288,060	-311,900	1.467,510	1.280,560	-319,900
43	-169,900	2.708,040	311,620	-341,700	2.703,840	766,250	43	968,880	1.286,140	-309,300	1.465,490	1.277,830	-319,300
44	-170,800	2.708,250	310,540	-342,300	2.704,600	764,220	44	968,700	1.289,330	-311,600	1.465,290	1.277,850	-318,800
45	-170,600	2.708,280	310,870	-341,100	2.703,220	767,900	45	971,260	1.287,470	-309,000	1.467,010	1.276,660	-326,800
46	-170,500	2.708,280	310,460	-341,300	2.703,170	767,270	46	965,220	1.286,570	-312,900	1.468,290	1.276,930	-322,600
47	-170,400	2.708,140	310,650	-341,700	2.703,920	766,080	47	972,800	1.289,580	-307,800	1.470,430	1.280,170	-322,800
48	-169,600	2.708,030	311,700	-342,100	2.704,180	765,390	48	968,000	1.285,950	-312,000	1.463,680	1.277,220	-320,800
49	-170,200	2.708,590	310,720	-341,600	2.703,250	766,730	49	969,950	1.288,040	-309,300	1.459,460	1.274,570	-320,000
50	-171,400	2.708,790	309,650	-342,200	2.704,060	764,210	50	966,120	1.284,410	-308,300	1.462,690	1.275,520	-322,500
51	-171,100	2.708,610	310,090	-341,300	2.703,250	767,220	51	967,920	1.283,200	-304,700	1.463,270	1.280,370	-323,400

Abbildung 20: Messprotokoll 03 + 04

Aufzeichnung WindowsMixedReality in mm							Aufzeichnung ARTrack in mm						
NR	Position 1			Position 2			NR	Position 1			Position 2		
	X	Y	Z	X	Y	Z		X	Y	Z	X	Y	Z
1	10,230	2.094,980	144,610	-125,200	2.091,540	627,120	1	1.265,147	128,873	1.288,936	1.761,960	125,468	1.283,174
2	11,340	2.095,890	144,430	-125,700	2.091,840	616,880	2	1.265,163	128,873	1.288,937	1.761,932	125,484	1.283,232
3	12,270	2.095,330	144,300	-125,300	2.091,560	616,430	3	1.265,149	128,862	1.288,974	1.761,924	125,469	1.283,244
4	11,540	2.095,770	144,420	-125,700	2.091,870	616,550	4	1.265,138	128,868	1.288,953	1.761,938	125,480	1.283,193
5	12,450	2.095,460	144,240	-126,200	2.091,860	616,350	5	1.265,156	128,872	1.288,980	1.761,928	125,480	1.283,230
6	10,870	2.095,710	144,220	-125,900	2.091,970	616,720	6	1.265,167	128,881	1.288,952	1.761,939	125,478	1.283,226
7	11,110	2.096,170	143,690	-125,900	2.092,100	618,770	7	1.265,170	128,897	1.288,952	1.761,939	125,497	1.283,204
8	10,860	2.096,370	144,060	-126,600	2.092,060	615,310	8	1.265,164	128,889	1.288,963	1.761,946	125,496	1.283,197
9	10,540	2.096,330	144,260	-126,100	2.092,620	616,360	9	1.265,149	128,889	1.288,949	1.761,949	125,505	1.283,210
10	10,770	2.096,790	144,030	-126,300	2.092,410	616,620	10	1.265,157	128,899	1.288,981	1.761,929	125,510	1.283,220
11	10,940	2.096,020	143,920	-126,700	2.092,180	614,870	11	1.265,161	128,908	1.288,970	1.761,938	125,509	1.283,221
12	11,690	2.097,180	144,480	-125,000	2.093,880	623,480	12	1.265,158	128,896	1.288,956	1.761,944	125,494	1.283,215
13	11,310	2.097,210	144,840	-124,900	2.094,280	624,330	13	1.265,174	128,906	1.288,974	1.761,924	125,510	1.283,235
14	10,900	2.097,270	144,990	-124,800	2.094,630	623,870	14	1.265,179	128,909	1.288,992	1.761,931	125,501	1.283,240
15	10,720	2.098,160	144,710	-126,200	2.094,870	623,300	15	1.265,174	128,905	1.288,984	1.761,941	125,502	1.283,195
16	10,720	2.098,310	144,550	-125,600	2.094,410	622,800	16	1.265,226	128,917	1.288,965	1.761,953	125,516	1.283,230
17	10,920	2.097,510	144,610	-125,400	2.094,590	626,800	17	1.265,216	128,883	1.288,962	1.762,045	125,464	1.283,203
18	9,660	2.098,400	144,660	-125,100	2.094,890	622,830	18	1.265,217	128,881	1.288,990	1.762,023	125,462	1.283,234
19	10,150	2.098,620	144,630	-124,800	2.095,200	625,540	19	1.265,216	128,880	1.288,972	1.762,038	125,460	1.283,208
20	10,830	2.098,440	144,500	-124,000	2.092,510	624,530	20	1.265,222	128,891	1.288,982	1.762,010	125,474	1.283,253
21	11,210	2.098,060	145,340	-123,500	2.093,080	623,760	21	1.265,214	128,876	1.288,999	1.762,032	125,464	1.283,235
22	10,910	2.097,740	145,020	-125,500	2.093,880	623,020	22	1.265,220	128,891	1.288,970	1.762,005	125,458	1.283,256
23	10,960	2.097,030	144,480	-127,300	2.094,160	617,400	23	1.265,215	128,895	1.288,966	1.762,006	125,464	1.283,227
24	10,970	2.096,790	145,260	-126,100	2.094,120	622,200	24	1.265,212	128,902	1.288,958	1.762,004	125,486	1.283,206
25	9,950	2.099,030	144,940	-125,700	2.094,050	619,210	25	1.265,193	128,927	1.288,951	1.761,985	125,506	1.283,217
26	9,560	2.098,460	144,490	-123,500	2.092,010	624,620	26	1.265,188	128,936	1.288,951	1.761,999	125,519	1.283,185
27	10,240	2.099,580	145,440	-124,400	2.092,140	623,650	27	1.265,209	128,917	1.288,948	1.761,997	125,498	1.283,206
28	9,920	2.099,270	145,250	-124,600	2.092,590	622,410	28	1.265,213	128,909	1.288,968	1.761,992	125,500	1.283,224
29	9,620	2.098,890	145,420	-125,300	2.093,960	621,370	29	1.265,209	128,916	1.288,970	1.762,014	125,495	1.283,214
30	10,470	2.098,440	144,930	-127,300	2.093,970	623,600	30	1.265,218	128,919	1.288,954	1.762,017	125,487	1.283,170
31	11,650	2.097,480	145,510	-128,100	2.094,220	622,850	31	1.265,206	128,921	1.288,988	1.762,006	125,496	1.283,207
32	10,760	2.098,700	145,060	-127,600	2.094,130	623,680	32	1.265,204	128,927	1.288,953	1.762,023	125,502	1.283,160
33	9,960	2.098,820	145,130	-128,600	2.093,690	624,390	33	1.265,210	128,927	1.288,951	1.762,000	125,510	1.283,201
34	9,960	2.097,800	146,550	-128,200	2.093,910	623,880	34	1.265,207	128,919	1.288,982	1.762,008	125,504	1.283,196
35	9,810	2.097,630	145,580	-124,800	2.092,040	626,310	35	1.265,215	128,934	1.288,953	1.762,019	125,507	1.283,183
36	10,780	2.095,940	144,600	-126,300	2.092,150	627,080	36	1.265,213	128,919	1.288,958	1.761,995	125,513	1.283,208
37	10,110	2.096,790	145,010	-125,000	2.091,510	626,320	37	1.265,214	128,922	1.288,957	1.762,015	125,499	1.283,204
38	9,620	2.096,390	144,990	-126,600	2.092,010	616,470	38	1.265,210	128,922	1.288,990	1.761,997	125,511	1.283,210
39	8,660	2.096,250	144,790	-126,000	2.093,020	626,420	39	1.265,208	128,929	1.288,965	1.761,988	125,509	1.283,233
40	10,320	2.096,270	146,770	-127,000	2.092,780	626,660	40	1.265,202	128,925	1.288,964	1.761,992	125,535	1.283,219
41	9,210	2.096,070	145,810	-126,000	2.092,830	625,920	41	1.265,208	128,929	1.288,975	1.762,016	125,529	1.283,179
42	9,660	2.096,360	145,880	-126,900	2.092,100	625,850	42	1.265,214	128,925	1.288,956	1.762,001	125,505	1.283,218
43	9,630	2.096,360	145,870	-126,500	2.092,480	626,490	43	1.265,227	128,925	1.288,965	1.761,994	125,515	1.283,237
44	8,840	2.096,800	145,390	-127,000	2.093,300	626,070	44	1.265,228	128,921	1.288,982	1.761,991	125,511	1.283,237
45	9,340	2.097,220	145,550	-126,100	2.093,470	626,400	45	1.265,228	128,909	1.288,969	1.762,020	125,497	1.283,199
46	10,460	2.097,060	145,640	-126,100	2.092,910	626,430	46	1.265,230	128,906	1.288,988	1.761,997	125,495	1.283,226
47	9,610	2.097,540	145,790	-126,500	2.093,460	625,910	47	1.265,214	128,906	1.288,976	1.762,011	125,500	1.283,226
48	10,350	2.098,120	145,830	-127,600	2.093,650	615,530	48	1.265,223	128,897	1.288,983	1.762,013	125,498	1.283,217
49	10,670	2.098,670	145,650	-126,500	2.093,580	620,910	49	1.265,225	128,901	1.288,985	1.762,014	125,490	1.283,229
50	9,380	2.098,530	145,700	-128,200	2.094,980	617,220	50	1.265,225	128,900	1.288,982	1.762,027	125,489	1.283,197
51	8,400	2.097,730	145,460	-125,800	2.093,340	621,150	51	1.265,227	128,903	1.288,969	1.762,008	125,500	1.283,228

Abbildung 21: Messprotokoll 05 + 06

7. Referenzen

- [1] Valve Corporation, „github,“ 2015. [Online]. Available:
<https://github.com/ValveSoftware/openvr>; <https://github.com/kbigdelysh/HTCViveRawData>.
[Zugriff am 09 April 2020].

8. Impressum

Verantwortlich für die Inhalte dieses Atlases ist das Virtual Dimension Center (VDC) Fellbach. Die Inhalte dieser Publikation wurden mit größter Sorgfalt erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte kann jedoch keinerlei Gewähr übernommen werden. Die Inhalte unterliegen dem deutschen Urheberrecht. Die Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und jede Art der Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts bedürfen der schriftlichen Zustimmung des Erstellers.

Verantwortlich für den Inhalt:

Virtual Dimension Center (VDC) Fellbach
Kompetenzzentrum für Virtuelle Realität und kooperatives Engineering w.V.
Vitor Macedo
Auberlenstr. 13
70736 Fellbach
URL: www.vdc-fellbach.de

Kontakt:

Tel.: +49(0)711 58 53 09-0
Fax : +49(0)711 58 53 09-19
Email: vitor.macedo@vdc-fellbach.de

9. Förderhinweis



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND WOHNUNGSBAU

Die vorgestellten Arbeiten entstanden im Rahmen des Projekt "*Applikationszentrum V/AR*", welches durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg gefördert wird.