



Samuel Jost, BSc

**Genauigkeitsuntersuchung
eines Virtual Reality Systems
am Beispiel des Systems
HTC Vive Pro**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing Dr.techn. Werner Lienhart

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Diese Seite möchte ich nutzen, um den Personen zu danken, welche durch ihre Unterstützung zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt der Firma Magna International Inc. (Magna), vertreten durch Dipl.-Ing. Severin Stadler und Dipl.-Ing. Markus Salchner, sowie Dipl.-Ing. Robert Hofstadler vom Institut für Fahrzeugtechnik der TU Graz für die Zurverfügungstellung der zusätzlichen Hardware und die Möglichkeit, die Anforderungen der Industrie an dieses System kennenzulernen. Weiters möchte ich mich für die interessierten Fragen und Diskussionen zum Thema bedanken.

Beim Institut für Geodäsie der TU Graz bedanke ich mich für die Möglichkeit, den Drehtisch in den Versuchsaufbauten zu verwenden.

Dank gebührt auch meinen Studienkollegen¹, welche mir während des gesamten Studiums und im Zuge der Masterarbeit immer die Möglichkeit gegeben haben, meine Problemstellungen mit ihnen zu diskutieren, wodurch sie zu neuen Lösungsansätzen und Ergebnissen beigetragen haben.

Ein großer Dank gilt auch meiner Familie und meiner Freundin für die Unterstützung und die motivierenden Worte, die mich stets vorangetrieben haben. Ein Dank auch dafür, dass sie mir den Rücken frei gehalten haben und ich mich somit auf die Arbeit fokussieren konnte.

Abschließend möchte ich mich auch bei meinen Betreuern Prof. Dr. Werner Lienhart und Dipl.-Ing. Peter Bauer für ihre Ratschläge, die Diskussionen und die Unterstützung über die gesamte Arbeitszeit hinweg recht herzlich bedanken.

¹In der vorliegenden Arbeit wird aus Gründen der Lesbarkeit sowie der sprachlichen Vereinfachung die Sprachform des generischen Maskulinums verwendet. Die ausschließliche Verwendung der männlichen Form soll geschlechtsunabhängig verstanden werden.

Kurzfassung

Die Technologie der Virtual Reality (VR) ist mittlerweile in einem ausgereiften Zustand angekommen. Durch die sinkenden Kosten und die steigende Qualität der VR-Systeme eröffnen sich auch neue Anwendungsbereiche. Im Unterschied zum primären Nutzungsbereich in der Gaming-Branche, liegen die Anforderungen bei Anwendern in der produzierenden Industrie neben der Verfügbarkeit auch auf der Genauigkeit und der Stabilität des Positionierungssystems.

Diese Anforderungen wurden zum Anlass genommen, um das Gesamtsystem HTC Vive Pro aus geodätischer Perspektive zu untersuchen. In den Versuchen wurden neben den Größenordnungen des Messrauschens auch systematische Abweichungen für die verschiedenen Devicetypen (HMD, Controller und Tracker) bestimmt. Bei der Untersuchung des Einflusses mehrerer Lighthouses auf die Abweichungen konnte festgestellt werden, dass die modulare Erweiterbarkeit, welche als große Stärke des Systems gilt, derzeit auch die betragsmäßig größten Fehlereinflüsse bedingt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das vorliegende System lediglich unter gewissen Rahmenbedingungen den Anforderungen der Industrie gerecht werden kann. Es ist aber auch deutlich geworden, dass die vorhandene Hardware, kombiniert mit einer für diese Anforderung optimierten Software, deutlich genauere Messungen zulassen würde.

Abstract

The technology of virtual reality (VR) has now reached a mature state. Due to the decreasing costs and the increasing quality of VR systems, new fields of application are opening up. In contrast to the primary area of use, the gaming industry, the requirements of users in the production industry are not only the availability, but also the accuracy and stability of the positioning system.

These requirements lead into the idea to examine the entire HTC Vive Pro system from a geodetic perspective. In the tests, not only the measurement noise was determined, but also systematic errors were found. In contradiction to previous beliefs, in our tests, the modular expandability was not a great strength of the system, it caused the largest error influences in terms of amount.

The investigations have shown that, under certain conditions the present system can be used in terms of the requirements from the industry sector. Our results suggest, that combining the existing hardware with an optimized software, would deliver more accurate measurements.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Virtual Reality	1
1.2	Virtual Reality System	1
1.3	Entstehungsgeschichte von VR Systemen	1
1.4	Anforderungen an ein aktuelles VR System	4
1.5	Kategorisierung aktueller VR Systeme	4
1.5.1	Anzahl der Freiheitsgrade	4
1.6	Ansätze zur Bestimmung der Ausrichtung und Position	5
1.6.1	Inertiale Messeinheit/Magnetometer	5
1.6.2	Spatial Scan	6
1.7	Beispiele aktueller VR Systeme	7
1.7.1	Google Cardboard	7
1.7.2	Oculus Rift S	7
1.7.3	HTC Vive Pro	8
1.8	Anwendungsbeispiel eines VR Systems bei Magna Graz	9
1.9	Warum Genauigkeitsuntersuchung der HTC Vive Pro?	9
2	Theoretische Einführung	11
2.1	Systematische Untersuchung eines Messsystems	11
2.1.1	Definition Messsystem	11
2.1.2	Arten der Systemuntersuchung	11
2.1.3	Standardisierte Untersuchungen in der Geodäsie	12
2.1.4	Systemuntersuchung spezifischer Messsysteme	12
2.2	Beispiel einer geodätischen Systemuntersuchung	13
2.3	Genauigkeit und Präzision	14
2.4	Koordinaten, Koordinatensysteme und Transformation	15
2.5	Leuchttürme in der Navigation	17
3	HTC Vive Pro	18
3.1	Datenübertragung zwischen den Komponenten	18
3.2	Beschreibung der Einzelkomponenten	19
3.2.1	Brille (HMD)	19
3.2.2	Controller	19
3.2.3	Tracker	19
3.2.4	Lighthouse	21
3.2.4.1	Lighthouses der 1. Generation	21
3.2.4.2	Lighthouses der 2. Generation	22
3.3	Funktionsprinzip der Positionsbestimmung	24
3.3.1	Bestimmung der Sichtlinie zum Rezeptor	24
3.3.1.1	Lighthouses 1. Generation	24
3.3.1.2	Lighthouses 2. Generation	25
3.3.2	Bestimmung der Distanz zum Device	26
3.3.2.1	Geometrischer Ansatz	26
3.3.2.2	Lösung mittels Gleichungssystem	28
3.3.3	Genauigkeitsabschätzung der Positionsbestimmung	29
3.3.4	Möglichkeiten durch die Verwendung eines zweiten Lighthouses	31

4	Praktische Untersuchung des Systems HTC Vive Pro	32
4.1	Beschreibung der verwendeten Komponenten	32
4.2	Grundsetup der Messungen	32
4.2.1	Messumgebung	32
4.2.2	Referenzmesssysteme	33
4.2.2.1	Horizontalkomparator	33
4.2.2.2	Leica TM1100 – Umbau IGMS	34
4.2.3	Zusätzliche Hardware	35
4.2.3.1	Adapter Tracker	35
4.2.3.2	Adapter Controller	35
4.2.3.3	Adapter Brille	36
4.2.3.4	Drehtisch RAK200	37
4.2.4	Ansteuerung des HTC Vive Pro Systems	37
4.2.4.1	Verwendete Softwareversionen	38
4.2.4.2	Unterschiede zwischen Unity und VRED	38
4.2.4.3	Messroutinen in Unity	38
4.2.4.4	Datenaufzeichnung mit Autodesk VRED	39
4.3	Untersuchung des Verhaltens der Koordinatenmessung der Devices	40
4.3.1	Untersuchung des Messrauschens	40
4.3.1.1	Messaufbau Messrauschen Pfeiler 1	40
4.3.1.2	Messaufbau Messrauschen Pfeiler 2	42
4.3.1.3	Messaufbau Messrauschen Raster	43
4.3.1.4	Messaufbau Messrauschen Komponentenvergleich	45
4.3.2	Untersuchung des Messbereichs der Devices	47
4.3.2.1	Messaufbau Komparator Öffnungswinkel	47
4.3.2.2	Messaufbau Komparator Distanz 1	50
4.3.2.3	Messaufbau Komparator Distanz 2	52
4.3.3	Wiederholbarkeit der Messungen	54
4.3.4	Maßstabsüberprüfung	56
4.3.5	Untersuchung auf rotationsabhängige Systematiken	57
4.3.5.1	Messaufbau Rotationstest Tracker - 1 Lighthouse	57
4.3.5.2	Messaufbau Rotationstest Tracker - Ausfall einer Diode	63
4.3.5.3	Überprüfung des Koordinatenzentrums des Trackers	64
4.3.5.4	Messaufbau Rotationstest Tracker - 2 Lighthouses	66
4.3.5.5	Messaufbau Rotationstest Controller	69
4.3.5.6	Messaufbau Rotationstest HMD	72
4.3.5.7	Rotationstest Vergleich der Komponenten	75
4.3.6	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Untersuchung der Koordinatenmessung	75
4.4	Untersuchung des Verhaltens der Orientierungsmessung der Devices	77
4.4.1	Orientierung Controller	77
4.4.2	Orientierung Tracker	80
4.5	Devicebezogene Auffälligkeiten des Trackers	84
4.5.1	Orientierungssprung des Trackers	84
4.5.2	Koordinatensprünge des Trackers	87
4.6	Untersuchung des Koordinatensystems	91
4.6.1	Wie wird das Koordinatensystem definiert?	91
4.6.1.1	Untersuchung der Horizontalebene	91
4.6.2	Stabilität des Koordinatensystems	92

4.6.3	Untersuchung der Bestimmung der Position und Orientierung der Lighthouses	96
4.7	Vergleichsmessungen mit VRED	99
4.7.1	Vergleich der Rotation des Trackers	99
4.7.2	Vergleich Orientierungssprung	103
5	Limitation der Untersuchungen	104
6	Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse	105
6.1	Anwendbarkeit des Systems als Positionierungssystem mit Fokus auf Genauigkeit und Stabilität	107
6.2	Entwicklungspotential des Systems	108
7	Fazit und Ausblick	109

Abkürzungsverzeichnis

DoF	Degrees of Freedom - Freiheitsgrade
EDM	elektronische Distanzmessung
FFT	Fast Fourier Transformation
HMD	Head-Mounted-Display - Synonym für VR Brille
IGMS	Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme an der Technischen Universität Graz
IMU	Inertial Measurement Unit
IR	Infrarot
Leica	Leica Geosystems AG
Magna	Magna International Inc.
NASA	National Aeronautics and Space Administration
TU Graz	Technische Universität Graz
VHF	very high frequency - Englische Bezeichnung für Ultrakurzwellen
VOR	very high frequency (VHF) omnidirectional range
VR	Virtual Reality

1 Einleitung

1.1 Virtual Reality

Brill (2009) gibt in seinem Buch *VIRTUAL REALITY* an, dass eine eindeutige Definition des Begriffes VR zu finden nicht möglich ist. Er verweist aber auch auf die Definition von Brockhaus (2019), welcher die VR beschreibt als

... eine von Computern und entsprechenden Programmen simulierte Welt, die dem Nutzer durch spezielle Techniken und Schnittstellen vermittelt wird.

In anderen Definitionen wird hervorgehoben, dass die VR dem Nutzer nicht nur vermittelt wird, sondern auch die Möglichkeit besteht, in diese eingebunden zu werden [Brill, 2009] und mit zusätzlicher Sensorik mit den Objekten der VR zu interagieren [Zobel et al., 2018].

1.2 Virtual Reality System

Wie schon die Definitionen zeigen, benötigt die VR eine Vielzahl von Komponenten, um für den Nutzer zugänglich zu sein bzw. um überhaupt entstehen zu können. Diese Kombination aus unterschiedlicher Hard- und Software kann man am besten als Virtual Reality System bezeichnen. Die Komponenten eines solchen Systems kann man grundlegend in drei funktionale Bereiche unterteilen. Für die Interaktion mit dem Benutzer gibt es meist ein Hardwareinterface, welches je nach Art des Systems unterschiedlich ausfallen kann. Als zweiter wichtiger Bestandteil ist die Entwicklungsumgebung, in welcher die VR konzipiert wird, zu nennen. Heutzutage wird das Erstellen durch sogenannte GameEngines erleichtert. Die dritte Komponente eines VR Systems ist die Laufzeitumgebung (Runtime Enviroment), welche die zuvor erstellte VR darstellt und auf Nutzereingaben reagiert.

1.3 Entstehungsgeschichte von VR Systemen

In der Entstehungsgeschichte der VR hat es verschiedene Ansätze gegeben, um in eine VR einzutau-chen. Die ersten Versuche, eine VR zu nutzen, wurden während des ersten Weltkrieg unternommen. In dieser Zeit wurde mit dem *LINK FLIGHT TRAINER* (Abbildung 1.1) der erste Flugsimulator gebaut, um die Piloten der Kampfflugzeuge zu trainieren [De Angelo, 2000]. Im Unterschied zu heutigen VR Systemen war der *LINK FLIGHT TRAINER* ein vollkommen mechanisches System.

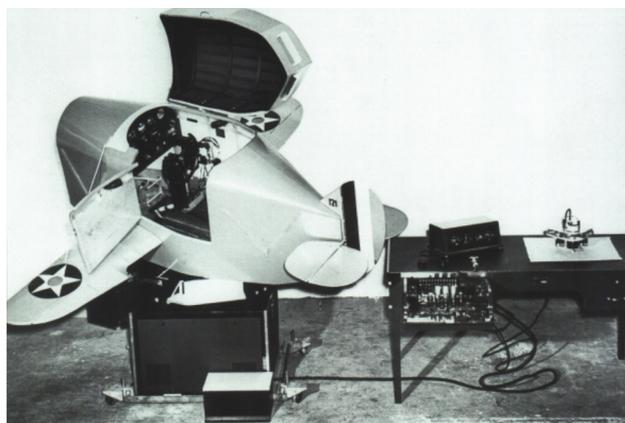


Abbildung 1.1: Link Flight Trainer [De Angelo, 2000]

Da die Entwicklung von softwaregestützten Systemen mit der Entwicklung der Informatik zusammenhing, gab es in den 1960er Jahren einen starken Schub im Bereich VR Systeme. Als zweiter Faktor für die Weiterentwicklung der VR Systeme ist die Entwicklung im Bereich des stereoskopischen Sehens von Morton Heilig, welcher 1962 sein Patent des SENSORAMA SIMULATORS (Abbildung 1.2) angemeldet hat, zu erwähnen [Sensorama Simulator, 1962].



Abbildung 1.2: Sensorama [Mas, 2012]

Die Verbindung der weiterentwickelten Elemente der Informatik und des stereoskopischen Sehens wurde 1970 an der University of Utah geschaffen, als das erste VR System mit einem Head-Mounted-Display (HMD) als Ausgabeinterface unter dem Namen DAMOKLESSCHWERT (Abbildung 1.3) getestet wurde [Sutherland, 1968].

Ab dem Jahr 1980 befasste sich auch die National Aeronautics and Space Administration (NASA) mit dem Thema VR. Diese brachte unter anderem den ersten Datenhandschuh als neue Möglichkeit der Interaktion zwischen VR und Nutzer hervor. Eine komplett andere Art der Darstellung einer VR entwickelte 1992 das Electronic Visualization Laboratory der University of Illinois. Die sogenannte CAVE stellte die Virtuelle Realität nicht nur in einer Brille für einen Nutzer dar, sondern verwandelte einen ganzen Raum in eine Virtuelle Realität [Cruz-Neira et al., 1992].

Im Jahr 1999 fasste Brooks (1999) in seinem Artikel WHATS REAL ABOUT VIRTUAL REALITY den Stand der Technik zu diesem Zeitpunkt zusammen und gab an, dass VR bereits 1994 beinahe funktioniert habe und zum Zeitpunkt der Studie (1999) nun auch wirklich funktioniere. In den Jahren seit 1999 hat sich die Qualität der VR Systeme, auch aufgrund der steigenden Rechnerleistungen und verbesserten Hardwaresysteme, stetig weiterentwickelt. Bei den eingesetzten Systemen handelte es sich aber immer um hochpreisige Spezialkonstruktionen für bestimmte Anwendungsbereiche.

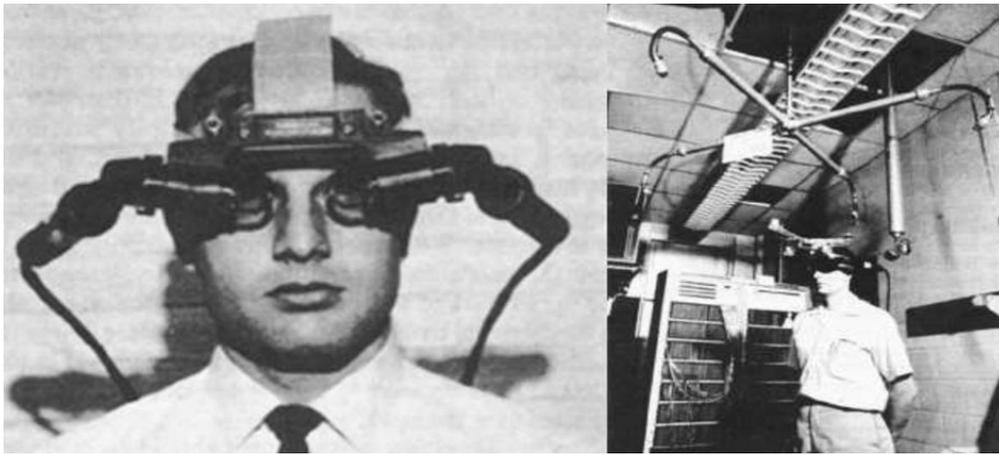


Abbildung 1.3: HMD von Sutherland (Damoklesschwert) [Van Krevelen, 2007]

Die erste Entwicklung in Richtung der Consumer-² bzw. Gaming-Branche erfolgte 2012 mit der Entwicklung der OCULUS RIFT. Dieses HMD-System wird oft als das erste kommerziell erhältliche, und in einem für Endnutzer bezahlbaren Preissegment angesiedelte, VR System bezeichnet [Zobel et al., 2018].

Betrachtet man den Gartner Hype Cycle aus dem Jahr 2017 in Abbildung 1.4, befand sich die VR am Pfad der Erleuchtung und es wurde prognostiziert, dass das Plateau der Produktivität in zwei bis fünf Jahren erreicht werden würde [Panetta, 2017]. Da im Jahr 2018 die VR im Gartner Hype Cycle nicht mehr gelistet wurde, ist davon auszugehen, dass die Technologie der VR in einem ausgereiften Zustand ist [Panetta, 2018]. Trotz dieser Einschätzung erfolgt die Entwicklung neuer VR Systeme und Anwendungen derzeit in hoher Geschwindigkeit und es ist davon auszugehen, dass es im Bereich der VR Systeme noch interessante Entwicklungen geben wird. Ein Beispiel für eine mögliche zukünftige Verschmelzung zwischen Realität und VR zeigt z.B. der aktuelle Hollywoodfilm READY PLAYER ONE, welcher auf dem gleichnamigen Buch von Cline (2011) basiert.

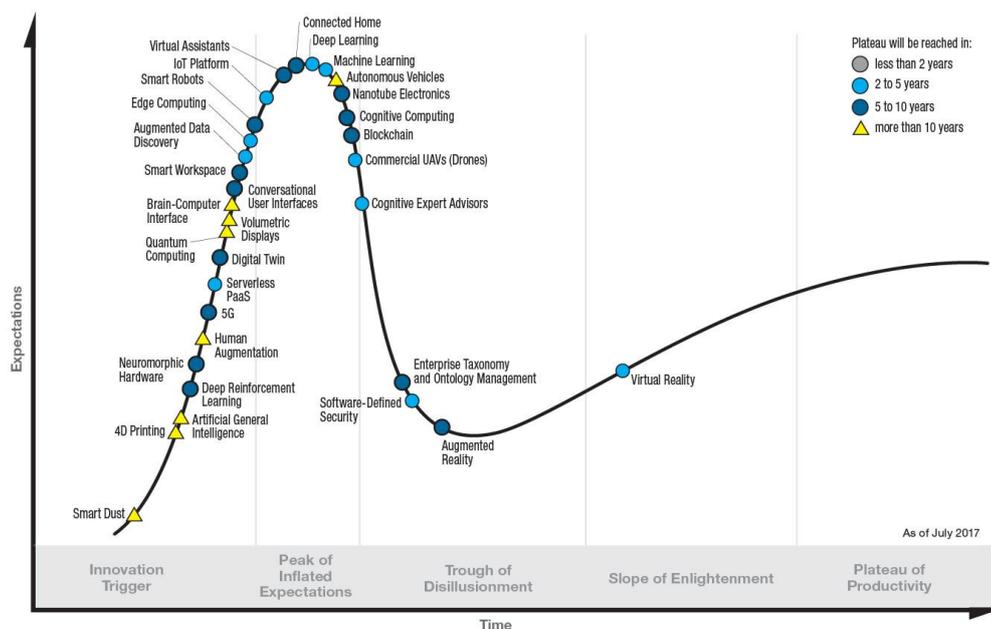


Abbildung 1.4: Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies 2017 [Panetta, 2017]

²Konsumgüterindustrie / Ausrichtung des Verkaufs von Produkten an den Endnutzer als Massenprodukt.

1.4 Anforderungen an ein aktuelles VR System

Das Ziel aller VR Systeme ist eine möglichst gute Immersion des Nutzers in die VR. Dieses Eintauchen des Nutzers hat zum Ziel, das Wissen darüber, dass es sich um eine Virtuelle Realität handelt, in den Hintergrund zu verdrängen und die virtuelle Umgebung als real zu empfinden. Dies erfolgt softwareseitig durch eine optimal simulierte Welt. Hardwareseitig gibt es zwei Hauptkomponenten: Erstens muss die Darstellung der VR so erfolgen, dass es sich für den Nutzer wie die Realität darstellt. Zweitens muss die Interaktion des Nutzers mit dem System möglichst intuitiv und natürlich erfolgen. Für diese Interaktion mit der VR hat der Nutzer je nach System unterschiedliche Möglichkeiten. Bei den meisten Systemen mit HMD verursacht eine Bewegung des Kopfes und somit auch des HMD eine Änderung der Ansicht in der Brille. Je nach Systemgröße kann sich der Nutzer auch mit der Brille im Raum bewegen. Zusätzliche Möglichkeiten zur Interaktion mit der VR sind meist durch sogenannte Controller möglich, welche die Hände des Nutzers in der VR steuern. Komplexere Systeme können durch spezielle Anzüge den ganzen Körper in der VR abbilden. Um die Interaktionen des virtuellen Körpers so realistisch wie möglich erscheinen zu lassen und somit eine Immersion des Nutzers zu fördern, ist eine genaue Bestimmung der relativen Bewegungen der einzelnen Komponenten zueinander notwendig.

1.5 Kategorisierung aktueller VR Systeme

Zur Unterteilung der aktuellen Systeme wird in der Literatur der Hardwareaufbau verwendet. Die erste Unterteilung erfolgt nach Ausgabeinterface, hierbei gibt es aufgrund der Entstehungsgeschichte der VR Systeme zwei Gruppen:

- Ausgabe brillenbasiert (HMD)
- Ausgabe im gesamten Raum (Beispiel CAVE)

Da es sich bei den beiden Systemgruppen um grundlegend unterschiedliche Konzepte handelt, und sich die weitere Arbeit mit einem speziellen HMD-System befasst, wird im Folgenden auf eine genauere Beschreibung der CAVE-Variante verzichtet.

1.5.1 Anzahl der Freiheitsgrade

Bei den HMD-basierten Systemen muss in Bezug auf die Orientierungs- und Positionsbestimmung noch der Freiheitsgrad des Systems betrachtet werden. Es sind Systeme mit 3 und 6 Freiheitsgraden erhältlich. In der VR-Fachwelt wird für die Bezeichnung der Freiheitsgrade oft die Abkürzung DoF vom englischen Degrees of Freedom verwendet.

- Systeme mit 3 Freiheitsgraden

Wie in Abbildung 1.5 ersichtlich ist, wird in einem System mit drei Freiheitsgraden nur die Veränderung der Ausrichtung des HMD verfolgt und in das Geschehen in der VR eingebunden. Bei den Systemen mit 3 Freiheitsgraden handelt es sich um Systeme, bei denen davon ausgegangen wird, dass der Nutzer seine Position nicht verändert. Um sein Umfeld in der VR komplett zu erfassen, hat der Nutzer nur die Möglichkeit, seinen Kopf zu drehen. Bewegt sich der Nutzer aber entgegen der Annahme des VR Systems doch, verändert sich durch diese Bewegung in der Darstellung nichts. Der menschliche Organismus reagiert mit diesen verwirrenden Einflüssen oft mit einem Schwindelgefühl und Unwohlsein, was auch als VR-Krankheit bezeichnet wird [Aukstakalins, 2017].

- Systeme mit 6 Freiheitsgraden

Bei Systemen mit 6 Freiheitsgraden wird auch die Translation des Kopfes bzw. des Nutzers im Raum erfasst und in der VR-Darstellung dementsprechend angepasst. Dadurch wird es dem Nutzer möglich, sich in der virtuellen Umgebung zu bewegen. Durch die verbesserte Verknüpfung zwischen realer und virtueller Bewegung wird eine bessere Immersion des Nutzers in der VR erreicht.

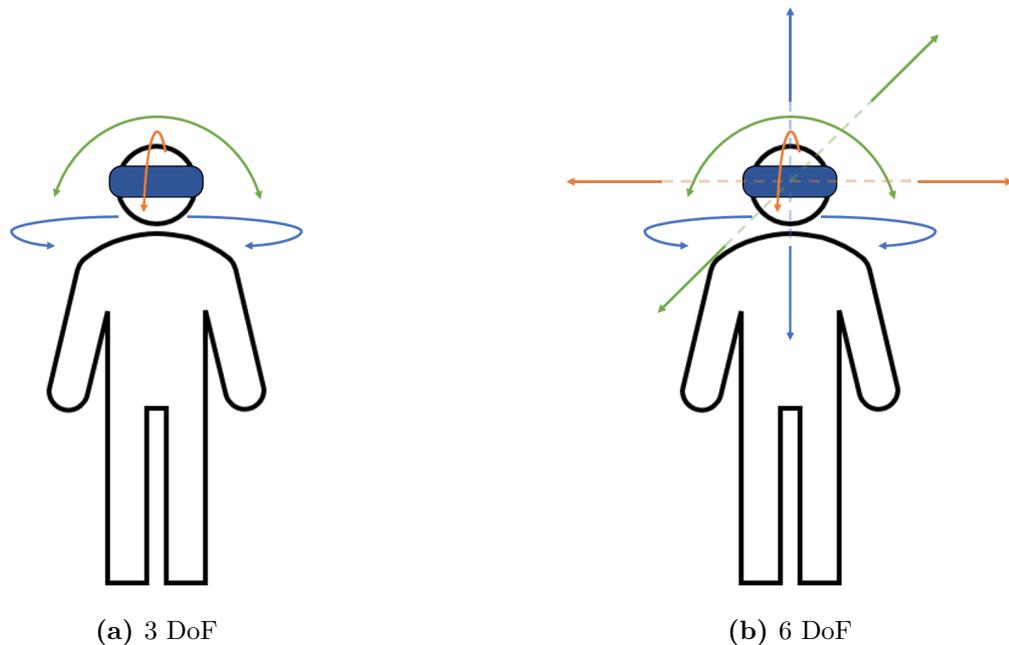


Abbildung 1.5: 3 DoF vs. 6 DoF angelehnt an Barnard (2019)

1.6 Ansätze zur Bestimmung der Ausrichtung und Position

Im HMD-Bereich gibt es eine breite Bandbreite von Systemen, begonnen bei der GOOGLECARD-BOARD, welche ein Smartphone in ein VR System verwandeln soll, bis hin zur HTC VIVE mit externen Stativen für Basisstationen. Alle Systeme benötigen ein möglichst genaues Wissen über die Bewegung des Kopfes/der HMD. Je nachdem, ob es sich um ein System mit 3 oder 6 Freiheitsgraden handelt, ist auch die Position des Nutzers im Raum ein wichtiger Bestandteil des Systems. Für diese Positionsbestimmung werden je nach Variante unterschiedliche Ansätze gewählt bzw. auch miteinander kombiniert, welche folgend kurz erklärt werden.

1.6.1 Inertiale Messeinheit/Magnetometer

Eine inertielle Messeinheit, oft auch Inertial Measurement Unit (IMU) genannt, kombiniert Messungen mit Beschleunigungssensoren (Akzelerometer) und Drehratensensoren (Gyroskope) in einem Sensorpaket. Es sind jeweils drei Sensoren orthogonal aufeinander angebracht, um die 6 Freiheitsgrade eines starren Körpers im dreidimensionalen Raum abzubilden [Titterton und Weston, 2004]. Bei den eingesetzten Sensoren in VR Systemen handelt es sich meist um kleine, billige Versionen, welche z.B. auch in Smartphones verwendet werden. In einem System mit nur 3 Freiheitsgraden reicht anstelle einer IMU auch eine Kombination von 3 Drehratensensoren, um die aktuelle Orientierung der Brille zu bestimmen. Handelt es sich dagegen um ein 6 DoF-System, welches eine IMU zur Positionsbestimmung verwendet, wird das Prinzip der Koppelnavigation oder auch Dead Reckoning angewendet. Beim Dead Reckoning wird, ausgehend von der Startposition, durch eine Kombination

der Werte der Drehratensensoren, für die Ausrichtung, und der Beschleunigungssensoren, für den zurückgelegter Weg (zweifache Integration), die aktuelle Position berechnet. Wie die Bezeichnung Koppelnavigation schon verrät, werden alle Messzeitpunkte seit dem Start der Messung aneinander gekoppelt. Durch diese Aneinanderreihung der Messungen wird auch die Messunsicherheit mit jeder weiteren Messung größer [Hofmann-Wellenhof et al., 2003]. Um die Effekte dieser relativen Systeme zu verringern, werden für die Bestimmung der Ausrichtung oftmals zusätzlich Magnetometer verwendet, welche die Berechnung durch eine Messung des Magnetfelds der Erde stützen.

1.6.2 Spatial Scan

Da sich eine Positionsbestimmung rein über inertielle Sensoren für die Genauigkeits- und Stabilitätsanforderungen komplexerer Systeme nicht eignet, werden diese meist mit der Technologie des Spatial Scans verknüpft [Rolland et al., 2001]. Spatial Scanning bedeutet, dass die komplette Umgebung des Nutzers nach Objekten, welche zum VR System gehören, abgetastet bzw. abgesucht wird.

Je nachdem, ob die Abtastsignale von der Brille ausgehen oder von zusätzlichen externen Komponenten, unterscheidet man folgende Systemarten [Wang et al., 1990]:

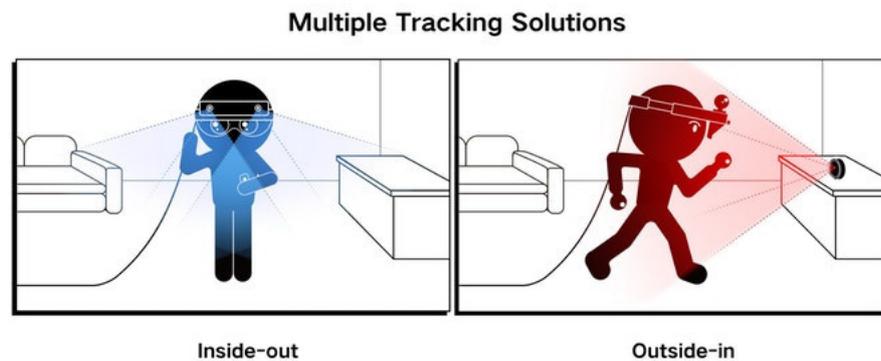


Abbildung 1.6: Inside-Out vs. Outside-In [ANTVR, 2019]

- Inside-Out

Bei den Inside-Out-Systemen gehen die Messungen von der Brille aus. Diese versucht aus Kamerabildern oder Laserimpulsen ihre Position im Verhältnis zur Umgebung zu bestimmen. Dieses Verfahren ermöglicht theoretisch eine Bewegung in einem unendlich großen Raum. Eine weitere Möglichkeit ist es, dass die von der Brille ausgesendeten Signale durch mehrere externe Empfänger empfangen werden und dadurch die Position der Brille bestimmt wird [Rolland et al., 2001].

- Outside-In

Bei den Outside-In-Systemen werden die Objekte des VR Systems wie Brille + Controller durch zusätzliche Hardware getrackt. Dies kann durch ein kamerabasiertes System erfolgen, welches ohne Empfänger auf der Brille auskommt und die Position der Brille aus dem aufgenommenen Bild bestimmt. Eine weitere Variante ist die Verwendung eines SWEEPING LASER BEAM. Bei diesem Funktionsprinzip wird ein rotierendes Lasersignal ausgesandt, welches durch den Raum streift. Auf der Brille befinden sich mehrere Empfänger, die das Signal auswerten und daraus wird anschließend die Position der Brille berechnet [Rolland et al., 2001]. Das Outside-In-Trackingverfahren ist immer auf einen endlich großen Anwendungsbereich begrenzt, welcher durch den Sichtbereich der Basisstationen begrenzt ist.

1.7 Beispiele aktueller VR Systeme

Im Folgenden werden beispielhaft drei aktuelle Systeme vorgestellt, bei welchen die beschriebenen Funktionsprinzipien angewandt werden. Abgesehen von GOOGLE CARDBOARD sind derzeit die marktbeherrschenden Anbieter OCULUS und HTC/VALVE. Neben den beschriebenen Systemen gibt es von beiden Herstellern noch abgeänderte Versionen, welche größtenteils mit den beschriebenen Systemen kompatibel sind bzw. sich das grundlegende Funktionsprinzip der Positionsbestimmung teilen.

1.7.1 Google Cardboard

Beim GOOGLE CARDBOARD (Abbildung 1.7) handelt es sich um ein kostengünstiges HMD-basierte VR System. Durch die Verwendung des Adapters, welcher mit speziellen Linsen eine stereoskopische Darstellung erzeugt, wird ein Smartphone zu einem VR System. Je nach Programmierung der verwendeten Apps, handelt es sich um ein 3 oder 6 DoF-System. Zur Bestimmung der Position und Orientierung werden die Inertialsensoren des Smartphones verwendet. Die Kosten des Adapters belaufen sich auf unter 10 Euro. Bildqualität und Bildfrequenz hängen bei diesem System natürlich vom verwendeten Smartphone ab. [Google, 2019]



Abbildung 1.7: Google Cardboard [Google, 2019]

1.7.2 Oculus Rift S

Bei der OCULUS RIFT S (Abbildung 1.8) handelt es sich um eine der aktuellsten HMDs auf dem Markt. Das im März 2019 vorgestellte 6 DoF-System arbeitet, anders als das Vorgängermodell, nach dem Inside-Out-Tracking-Prinzip. Im Gegensatz zur OCULUS RIFT, welche die Position mit externen Kameras bestimmt, sind beim aktuellen System keine externen Sensoren mehr notwendig [Oculus, 2019]. Das Trackingsystem der OCULUS RIFT S besteht aus 5 Kameras, welche in dem HMD integriert sind. Über einen Algorithmus werden aus den Bildern der Umgebung die Bewegungen der Brille berechnet [Carbotte, 2019]. Die Kameras der Brille sind auch für die Bestimmung der Position der Controller verantwortlich, was den Aktionsradius dieser etwas einschränkt. [Knapp, 2019]. Die Darstellung erfolgt mit 80 Hz auf zwei LCD-Displays mit einer Auflösung von 1.280 mal 1.440 Pixel. Zusätzlich zum VR System von Oculus, welches um 450 Euro zu erwerben ist, benötigen Nutzer noch einen leistungsstarken Gaming-PC.



Abbildung 1.8: Oculus Rift S [Oculus, 2019]

1.7.3 HTC Vive Pro

Die HTC VIVE PRO ist das Herzstück der zweiten Generation des von VALVE entwickelten und von HTC COOPERATIONS vertriebenen VR Systems. Wie auch schon das Vorgängermodell handelt es sich um ein System mit 6 DoF. Im Unterschied zu OCULUS arbeitet HTC mit einem Outside-In-System. Anstelle der Kameras werden bei der HTC Vive Pro Infrarotsignale zur Positionsbestimmung verwendet. Zusätzlich zu Brille und Controller sind aufgrund des Systemkonzepts externe Basisstationen, sogenannte Lighthouses, notwendig. Die Verwendung dieses Outside-In-Tracking Systems erlaubt auch die Einbindung zusätzlicher Hardware durch die Verknüpfung mit speziellen Tracking Devices. Dies ermöglicht z.B., einen realen Tennisschläger und dessen Bewegungen in der VR abzubilden. Die Darstellung der VR erfolgt auf zwei AMOLED-Displays mit je 2880 x 1600 Pixel. Da die HTC VIVE PRO auf professionelle Anwender ausgelegt ist, kostet sie mit 1399 Euro deutlich mehr als die Oculus Rift S. Auch bei diesem System ist zusätzlich noch ein leistungsstarker PC zur Verwendung notwendig. [Vive, 2019] Eine genauere Erklärung des Funktionsprinzips der HTC VIVE PRO folgt in Kapitel 3.



Abbildung 1.9: HTC Vive Pro Starter Kit [Vive, 2019]

1.8 Anwendungsbeispiel eines VR Systems bei Magna Graz

Wie schon zuvor erläutert, entstanden Systeme der beschriebenen Preisklasse in erster Linie für den Endnutzer im Spielektor. Der relativ geringe Preis durch die Massenproduktion und die beworbenen vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten haben aber auch das Interesse der Bereiche Industrie, Forschung und Bildung geweckt und es wurde eine Vielzahl von Anwendungen entwickelt. Ein Industriebereich, in welchem VR Systeme, im Speziellen auch die aktuellen HMD-Systeme, starke Verbreitung aufweisen, ist die Autoindustrie. Bei MAGNA STEYR werden VR Systeme bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge von Beginn an eingesetzt.

Aufgrund der Tatsache, dass das Design neuer Fahrzeuge und Komponenten ohnehin digital erfolgt, ist es nur logisch, zusätzlich zu den, traditionell verwendeten, Clay Modelle und Prototypen auch eine VR-Applikation einzusetzen. Dies ermöglicht es, Entwürfe schneller realitätsnahe zu betrachten und dadurch effizienter zu arbeiten sowie Kosten für Prototypen einzusparen. Ein weiterer Anwendungsfall im VR-Konzept von MAGNA STEYR, wie auch anderer Hersteller, ist die Möglichkeit, Fahrzeuge mit einem hohen Detailgrad auch von innen zu betrachten. Dies wird einerseits von Konstrukteuren einzelner Komponenten dazu genutzt, diese auf das Gesamtkonzept abzustimmen, andererseits vereinfacht es auch den Ablauf, entwickelte Modelle Entscheidungsträgern und Kunden zu präsentieren (Abbildung 1.10) [Glon, 2019].



Abbildung 1.10: Visualisierung eines Prototypen [FOCUS, 2017]

Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes ist die sogenannte Sitzkiste, welche bereits von verschiedenen Herstellern eingesetzt wird (Abbildung 1.11). Die Idee hierbei ist es, dem Betrachter zu ermöglichen, Teile der VR-Simulation des Fahrzeugs mit der Realität zu verknüpfen. Die Grundkonfiguration der Sitzkiste beinhaltet einen Fahrersitz und ein Lenkrad. Die Komponenten sind austauschbar, um sie bestmöglich mit der jeweiligen VR Simulation übereinstimmen zu lassen. Je nach Entwicklungsstufe des Projekts werden nach und nach Komponenten in der Realität ergänzt und der Nutzer kann immer mehr Komponenten und Funktionen des Fahrzeugs auch haptisch wahrnehmen und betätigen. Visuell erhält der Betrachter aber immer das zugehörige Bild aus der Simulation, wodurch das Gefühl entstehen soll, bereits im fertigen Fahrzeug zu sitzen.

1.9 Warum Genauigkeitsuntersuchung der HTC Vive Pro?

In einer Anwendung wie der in Kapitel 1.8 beschriebenen Sitzkiste handelt es sich im engeren Sinne um keine reine VR-Anwendung mehr. Vielmehr ist das Verbinden einer realen Umgebung mit seinem erweiterten virtuellen Zwilling eine Anwendung aus dem Bereich der Mixed Reality. Verbindet man im Modell unbewegliche Komponenten wie die Sitzkiste mit dem dazugehörigen Modell der VR Simulation, erhöhen sich die Anforderungen an das VR System deutlich. Je nach Detailgrad des



Abbildung 1.11: Sitzkiste [Porsche, 2019]

Modells ist eine Übereinstimmung des virtuellen Modells mit dem realen Objekt in einer Genauigkeit von besser als 1 cm gefordert. Diese ist notwendig, um z.B. Taster im Fahrzeuginnenraum auch mit aufgezogener VR-Brille bedienen zu können und durch eine Übereinstimmung der visuellen und haptischen Reize die Immersion zu fördern. Das System HTC Vive Pro, welches von MAGNA für die Anwendung in der Sitzkiste verwendet wird, wurde bisher noch in keiner Veröffentlichung auf eine Eignung in diesem Genauigkeitsbereich untersucht. Da es sich um ein Consumerprodukt handelt, wird auch vom Hersteller keine konkrete Angabe zur Größenordnung der Abweichungen benannt. Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, eine grundlegende Untersuchung des Gesamtsystems durchzuführen, um einerseits die zu erwartenden Genauigkeiten zu spezifizieren und andererseits ein Wissen über die Funktionsweise des Systems zu erlangen um dieses auch abseits der Herstellerempfehlungen bestmöglich einsetzen zu können.

2 Theoretische Einführung

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen dargestellt, welche für das Verstehen der folgenden Arbeit benötigt werden. Neben der Aufbereitung der geodätischen Grundlagen Genauigkeit, Präzision und Koordinatenrechnung wird auch auf die Untersuchung eines Messsystems genauer eingegangen. Da das zu untersuchende Messsystem in der Namensgebung der Basisstationen eine Analogie zu den in der Navigation gebräuchlichen Leuchttürme darstellt, werden auch diese theoretisch betrachtet.

2.1 Systematische Untersuchung eines Messsystems

In diesem Abschnitt wird auf die Untersuchung eines Messsystems genauer eingegangen. Beginnend mit der Definition des Begriffs, wird anschließend über die verschiedenen Ansätze zur Untersuchung und Kalibrierung aufgeklärt. Zum Abschluss wird die Wichtigkeit von Systemuntersuchungen mit einem Beispiel aus der Praxis belegt.

2.1.1 Definition Messsystem

In der DIN 66201 - 1 ist das System als

... abgegrenzte Anordnung von aufeinander einwirkenden Gebilden ...

definiert. Im Handbuch für Ingenieurgeodäsie wird anstelle des Gebildes der Begriff Prozess als

... Umformung und/oder der Transport von Materie, Energie beziehungsweise Informationen ...

eingeführt [Heunecke et al., 2013, S. 55]. Diese Definition beschreibt dadurch einerseits das System, welches beobachtet bzw. gemessen werden soll, andererseits kann auch das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten des Messsystems damit beschrieben werden. Hervorgehoben wird in der weiteren Beschreibung vor allem die Abgrenzung des Systems durch eine genaue Spezifizierung der Anforderungen und/oder der Ein- und Ausgangsgrößen [Heunecke et al., 2013]. Für Messsysteme in der Geodäsie wird diese Abgrenzung von Deumlich und Staiger (2002) mit der Systemzugehörigkeit aller Komponenten, welche das Messergebnis beeinflussen, beschrieben. Diese Komponenten sind neben allen Komponenten der Messausrüstung auch äußere physikalische Einflüsse wie Temperatur, Luftdruck und Sonneneinstrahlung. Auch der Beobachter wird, je nach Automatisierungsgrad, zum System gezählt. Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist das Vorgehen bei der Messung selbst. Ist dieses nicht genormt bzw. anderweitig definiert (Herstellervorgaben), kann es auch Einflüsse auf das Messergebnis haben [Deumlich und Staiger, 2002].

2.1.2 Arten der Systemuntersuchung

Bei der Untersuchung eines bestehenden Systems, in diesem Falle eines Messsystems, gibt es je nach Ausgangslage unterschiedliche Anforderungen und Ansätze. In Heunecke et al. (2013) werden drei Arten der Problemstellungen definiert:

- Direkte Problemstellung:
Die Eingangsgrößen und das Übertragungsverhalten des Systems sind bekannt und es sind die Ausgangsgrößen gesucht.
- Eingangsproblem/inverse Problemstellung:
Die Ausgangsgrößen sind bekannt und es soll auf die Eingangsgrößen geschlossen werden.

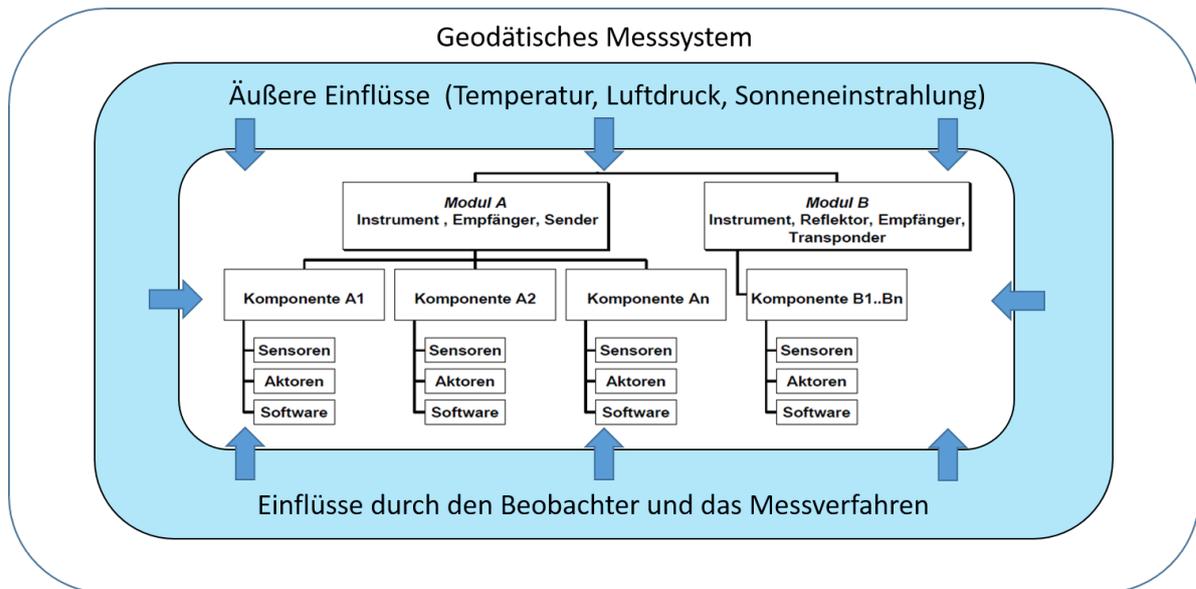


Abbildung 2.1: Geodätisches Messsystem angelehnt an Hennes und Ingensand (2000)

- Identifikationsproblem:

Aus gemessenen Ein- und Ausgangsgrößen soll das Übertragungsverhalten des Systems bestimmt werden. Für die Bestimmung des Modells wird eine Kombination aus theoretischer und experimenteller Systemanalyse mit anschließender Verifikation vorgeschlagen.

Bei der Untersuchung eines Messsystems handelt es sich um die dritte Art der Systemuntersuchung. Auch wenn in manchen Fällen das grundlegende Übertragungsverhalten bekannt ist, sind Untersuchungen und Kontrollen hinsichtlich systematischer Einflüsse und Genauigkeiten notwendig.

2.1.3 Standardisierte Untersuchungen in der Geodäsie

In der Geodäsie werden standardisierte Untersuchungen meist zu periodischen Überprüfungen von Herstellerangaben durchgeführt. Herstellerangaben, wie auch Normen zur Angabe und Überprüfung dieser, gibt es in den seltensten Fällen für gesamte Messsysteme. Üblicher sind Angaben für Einzelkomponenten wie z.B. bei Totalstationen die Überprüfung nach ISO 17123-3 für Richtungsmessungen und der Test nach ISO 17123-4 für elektronische Distanzmessungen.

2.1.4 Systemuntersuchung spezifischer Messsysteme

Untersuchungen für komplette Systeme werden hauptsächlich zur Optimierung einer Komponentenkombination, welche auch ein Messsystem darstellt, auf einen speziellen Anwendungsfall durchgeführt. Dieser Ansatz wird auch Kalibrierung genannt. Das Ziel ist es, systematische Abweichungen vom Soll-Verhalten, welche reproduzierbar sind, zu bestimmen, um eine Korrekturfunktion anbringen zu können. Im Zuge der Kalibrierung wird auch der Anteil der nicht kalibrierbaren Effekte bestimmt, um eine Systemgenauigkeit nach der Kalibrierung angeben zu können [Hennes und Ingensand, 2000].

In ihrer Publikation über Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung beschreiben Hennes und Ingensand (2000) die Anforderungen folgendermaßen:

- Die kalibrationspezifischen Störgrößen müssen von untergeordneter Bedeutung und ihre Größe bekannt sein. Außerdem muss sich mit Mitteln der Fehler- und Varianzfortpflanzung die Genauigkeit der Kalibrierung ableiten lassen.

- Die Methoden zur Kalibrierung sollten eine übergeordnete Genauigkeit aufweisen.
- Es ist eine vollständige Erfassung des Fehlerverhaltens anzustreben.
- Die Kalibrierung sollte für alle Gebrauchsbedingungen und Messbedingungen gültig sein.
- Die Kalibrierung sollte für den gesamten Messbereich gültig sein.
- Die Kalibrierfunktion sollte einfach gehalten und auf die Messungen anwendbar sein.

Speziell die Anforderung an alle Gebrauchs- und Messbedingungen lässt sich in der Praxis schwer realisieren. Wird das Messsystem einer Laborkalibrierung unterzogen, kann zwar den Anforderungen an die Genauigkeit Genüge getan werden, aber es können nicht alle Messbedingungen abgedeckt werden. Wird eine Kalibrierung im Feld unternommen, ist es schwer, alle Umwelteinflüsse zu modellieren. Dies ist von Fall zu Fall abzuwägen. Die Dokumentation bzw. die Einschränkungsgebiete der Kalibrierung sind mit den Parametern der Kalibrierkurve gemeinsam zu veröffentlichen und essentieller Bestandteil des Ergebnisses.

2.2 Beispiel einer geodätischen Systemuntersuchung

Ein Beispiel für eine Systemuntersuchung eines geodätischen Messsystems, welches auch in der Praxis oft verwendet wird, ist die Kombination aus einer Totalstation und eines 360-Grad-Prismas. Lackner und Lienhart (2016) haben in ihrer Publikation verschiedene Totalstation und Prismen typen kombiniert und die Ergebnisse der Messsysteme anschließend verglichen. Die Abhängigkeit der Ausrichtung und Verkippung auf die Messergebnisse sowie auch die distanzabhängigen Variationen dieser Werte wurden mittels spezieller Aufbauten im Labor des Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme an der Technischen Universität Graz (IGMS) untersucht.

Die Abbildung 2.2 zeigt ein Teilergebnis dieser Untersuchung. Es sind die Abweichungen der Distanzmessung dargestellt. Die Messungen wurden bei einem konstanten Abstand von 26 m durchgeführt. Die Abweichungen in der Größenordnung von bis zu ± 5 mm werden durch die unterschiedlichen Ausrichtungen des Prismas ausgelöst. Außerdem ist ersichtlich, dass die verschiedenen Totalstationen unterschiedlich große Abweichungen verursachen. Dieses Ergebnis unterstreicht somit die Wichtigkeit einer Systemkalibration mit allen eingesetzten Komponenten.

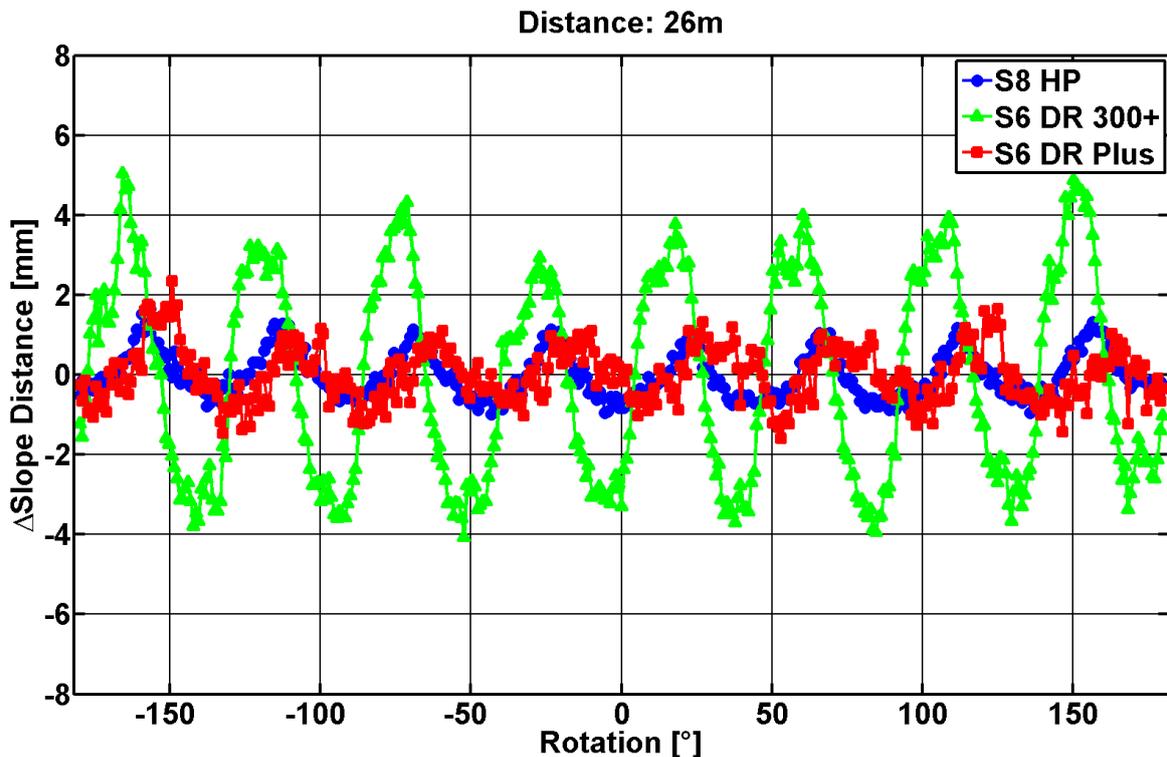


Abbildung 2.2: Abweichungen in der Distanzmessung zu einem MultiTrack 1000 target bei unterschiedlichen Ausrichtungen und Verwendung von 3 verschiedenen Totalstationen. [Lackner und Lienhart, 2016]

2.3 Genauigkeit und Präzision

In allen Anwendungen der Geodäsie wird deutlich zwischen Genauigkeit und Präzision unterschieden. Da diese Arbeit jedoch nicht ausschließlich an das Fachgebiet der Geodäsie gerichtet ist, wird der Unterschied im Folgenden kurz erklärt.

Die Genauigkeit beschreibt die Abweichung eines Messwertes zum wahren Wert. Ein Messsystem ist somit genau, wenn der absolute Fehler möglichst klein ist [Lira, 2002]. In Abbildung 2.3 ist dies dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der Mittelwert der Messung nicht mit dem wahren Wert übereinstimmt, und somit eine gewisse Ungenauigkeit aufweist. Die Präzision beschreibt hingegen die Wiederholbarkeit einer Messung. Je größer die Abweichungen der Einzelmessungen zueinander bzw. zum Mittelwert, desto unpräziser ist das Messsystem [Lira, 2002]. Zwischen Präzision und Genauigkeit besteht, wie die Abbildung 2.3 zeigt, kein direkter Zusammenhang. Eine Messung kann hochpräzise und trotzdem ungenau sein, oder auch genau und sehr unpräzise.

Um bei einem unpräzisen Messsystem eine Verbesserung herbeizuführen, kann (wenn es sich um nicht systematische Abweichungen handelt) die Anzahl der Einzelmessungen erhöht werden. Die Bestimmung der Genauigkeit dagegen kann nur durch Verwendung eines externen Referenzsystems höherer Ordnung erreicht werden.

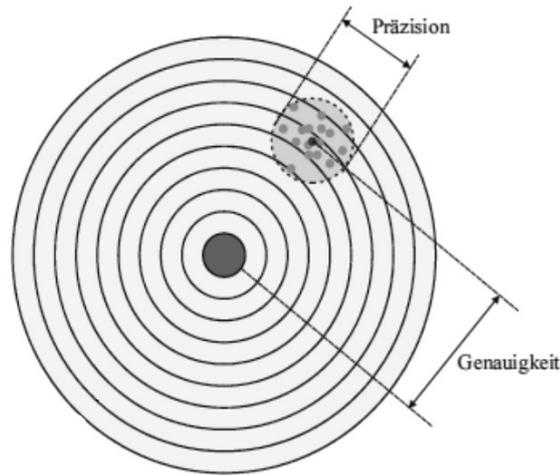


Abbildung 2.3: Genauigkeit und Präzision [Testo, 2019]

2.4 Koordinaten, Koordinatensysteme und Transformation

Wie in Kapitel 1.6 bereits erwähnt, ist die Positionsbestimmung der Devices eine der wichtigsten Funktion eines VR-Systems. Für die Beschreibung eines Punktes im Raum werden Koordinaten verwendet. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf die Theorie von Koordinaten, Koordinatensysteme und Koordinatentransformation eingegangen. Die Beschreibung ist zusammengefasst aus den Publikationen von Möser (2012), Hofmann-Wellenhof et al. (2003) und Niemeier (2008).

Zur Bestimmung eines Punktes im dreidimensionalen Raum ist neben den 3 Koordinaten auch eine Definition des Koordinatensystems notwendig. In der Geodäsie werden vorwiegend kartesische Koordinatensysteme angewendet. Diese sind durch den Koordinatenursprung und die paarweise orthogonal aufeinander stehenden Koordinatenachsen definiert. Die Achsen sind so angeordnet, dass diese ein rechtsdrehendes Koordinatensystem³ bilden.

Eine Spezialform der lokalen Koordinatensysteme stellen die objektbezogenen Koordinatensystemen dar. Im Fachbereich der Navigation werden diese auch als Body System bezeichnet. Der Ursprung und die Ausrichtung sind beim Body-System mit einem Objekt und dessen Eigenschaften verbunden. Ein Beispiel für eine solche Verbindung ist ein Flugzeug, bei welchem das Koordinatensystem angepasst an die Steuermöglichkeiten definiert ist.

Zur Beschreibung von Punkten im Raum können neben den kartesischen Koordinaten auch Polarkoordinaten verwendet werden. Diese definieren sich über die Entfernung des Punktes zum Ursprung r und dem Horizontal- (β) und Vertikalwinkel (δ). Der Zusammenhang zwischen den Koordinaten ist in der Formel 2.1 beschrieben und in der Abbildung 2.4 dargestellt.

$$\vec{X}_P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} \cos(\delta) \cdot \cos(\beta) \\ \cos(\delta) \cdot \sin(\beta) \\ \sin\delta \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Für die Umrechnung von Koordinaten zwischen verschiedenen Referenzsystemen ist der Zusammenhang zwischen diesen Referenzsystemen ausschlaggebend. In der Geodäsie wird dafür vorwiegend die dreidimensionale Helmert-Transformation verwendet, welche in der Formel 2.2 angeführt ist. Bei der Rotation handelt es sich um eine kombinierte Rotation um jede der drei Koordinatenachsen, wobei die Reihenfolge nicht beliebig ist. Neben der Rotation wird in diesem Modell auch

³auch Rechtssystem oder Koordinatensystem mit mathematisch positivem Drehsinn genannt

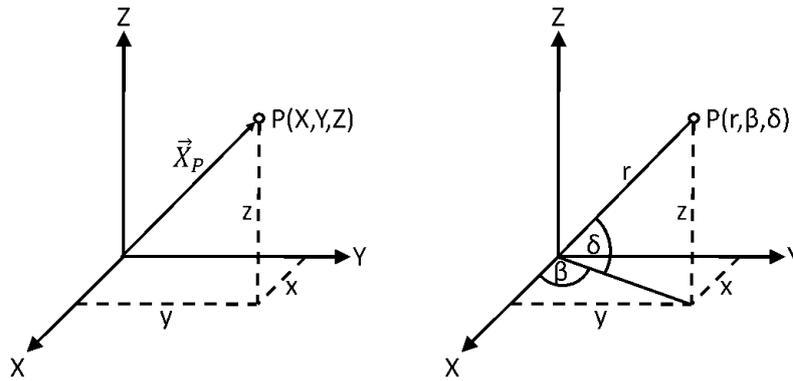


Abbildung 2.4: Vergleich kartesische und Polarkoordinaten, angelehnt an Möser (2012)

die Translation entlang der drei Achsen wie ein für alle drei Achsen konstanter Maßstabsfaktor eingeführt.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + m \cdot R(\omega_1, \omega_2, \omega_3) \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Neben der in der Mathematik üblichen Definition der rechtsdrehenden Koordinatensysteme ist in der Geodäsie ein Linkssystem gebräuchlich. Der Übergang zwischen den beiden Systemen kann mit einer Spiegelungsmatrix (Formel 2.3) erfolgen.

$$S_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

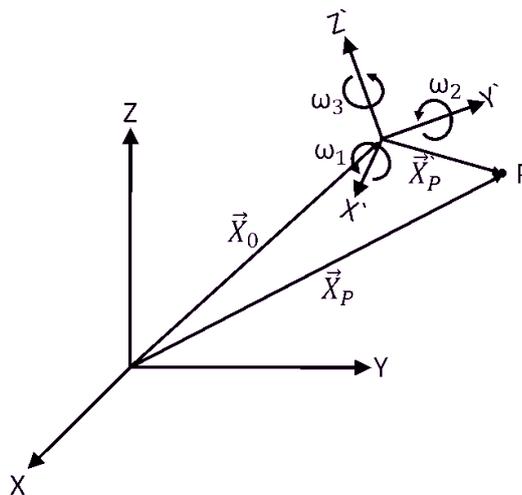


Abbildung 2.5: Koordinatensystemtransformation angelehnt an Niemeier (2008)

2.5 Leuchttürme in der Navigation

Leuchttürme werden seit über 2000 Jahren zur Unterstützung bei der Navigation von Schiffen verwendet [Deppmeyer, 2007]. Der Aufbau und die Aufgaben unterscheiden sich je nach Anwendungsgebiet. Neben reinen Warnfeuern und Leitfeuern, welche gefährliche Bereiche markieren, gibt es auch Orientierungs- und Richtfeuer, welche zur Positionsbestimmung der Schiffe verwendet werden können. Um die Signale nicht nur in eine Richtung auszusenden, werden die verwendeten Linsen mit einer konstanten Geschwindigkeit gedreht. Zur Unterscheidung der Leuchttürme werden diese Lichtsignale moduliert. Neben der Möglichkeit, das Lichtsignal farbig zu kennzeichnen, verwenden die Leuchttürme unterschiedliche Drehraten. Dadurch erhalten die ausgesendeten Blinksignale unterschiedliche Frequenzen [Toghill, 2003].

Eine Weiterentwicklung des klassischen Leuchtturms ist das very high frequency (VHF) omnidirectional range (VOR)-Prinzip. Im Unterschied zu den klassischen Leuchttürmen wird VOR hauptsächlich in der Luftfahrtnavigation verwendet und arbeitet nicht mit optischen Wellen, sondern im very high frequency (VHF)-Bereich (108 - 118 MHz). Helfrick (2015) beschreibt das Prinzip von VOR vereinfacht, indem er die Radiowellen durch Lichtsignale eines Leuchtturms ersetzt:

Ein rotierendes Signal wird für den Navigierenden sichtbar, wenn die Ausrichtung des Signals mit der Blickrichtung des Navigierenden zum Leuchtturm/VOR-Sender zusammenfällt. Wenn dieses rotierende Signal eine Referenzrichtung (z.B. die magnetische Nordrichtung) durchläuft, wird zusätzlich zum rotierenden Lichtsignal ein zweites Signal in alle Richtungen (omnidirektional) abgegeben. Über die Zeitdifferenz zwischen diesen Signalen kann die orientierte Richtung vom Leuchtturm zum Navigierenden bestimmt werden. Schematisch ist dieser Ablauf in Abbildung 2.6 dargestellt. In der Praxis werden diese Systeme nicht auf Leuchttürmen eingesetzt und es werden auch keine optischen Signale verwendet. Die auf Flughäfen positionierten Stationen senden elektromagnetische Wellen im VHF-Bereich aus. Zur Identifizierung der Signale ist auf der Trägerwelle (30 Hz) ein Morsesignal (1020 Hz) moduliert [Hofmann-Wellenhof et al., 2003]. Ist die Position des Senders bekannt und wird zusätzlich zur Orientierungsmessung ein System zur Bestimmung der Distanz verwendet, kann die Position des Navigators mittels einer polaren Punktbestimmung gelöst werden [Gruber und Joeckel, 2017]. Eine weitere Möglichkeit wäre auch die Verwendung mehrerer VOR-Basisstationen und die Berechnung der Position durch einen Vorwärtsschnitt mit Richtungen [Gruber und Joeckel, 2017].

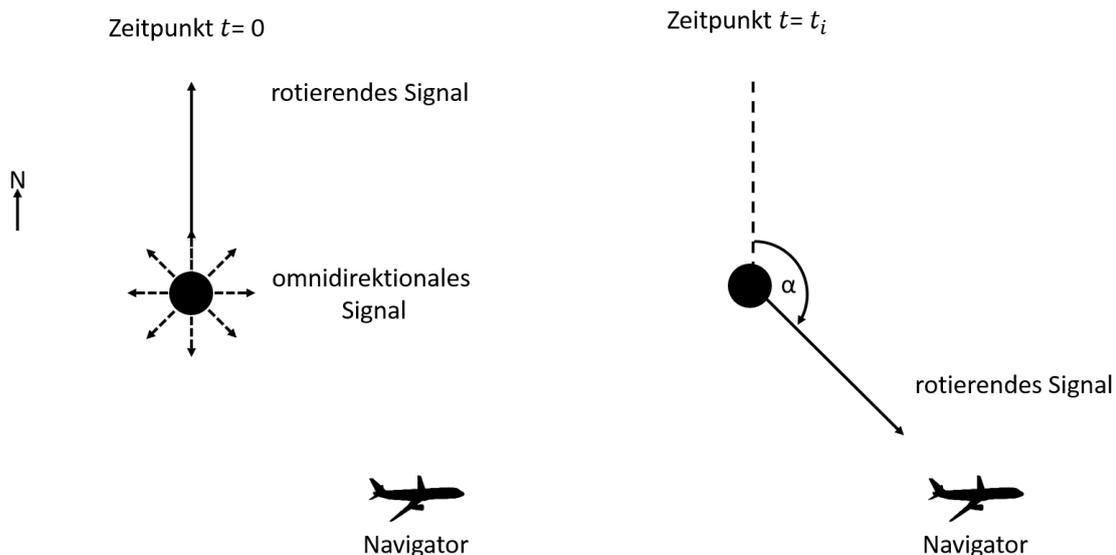


Abbildung 2.6: Funktionsprinzip VOR



Abbildung 3.2: HTC Vive Pro HMD [Vive, 2020]



Abbildung 3.3: HTC Vive Pro Controller [Vive, 2020]

3.2 Beschreibung der Einzelkomponenten

Um ein besseres Verständnis für das Gesamtsystem zu erhalten, ist eine genauere Betrachtung des Aufbaus und der Funktion der Einzelkomponenten unumgänglich. In den folgenden Kapiteln werden die unterschiedlichen Devicetypen genauer beschrieben.

3.2.1 Brille (HMD)

Wie schon in Kapitel 3.1 erwähnt, ist die Brille (Abbildung 3.2) das Herzstück des HTC Vive Pro-Systems. Zur Immersion des Nutzers in die VR verfügt das HMD über zwei AMOLED-Displays mit je 2880 x 1600 Pixel Auflösung. Auf diesen Displays wird mit einer Refreschrate von 90 Hz die VR, welche am PC berechnet wird, dargestellt. Um den Spieler auch akustisch in die VR zu befördern, sind auf der verstellbaren Halterung Kopfhörer angebracht. Um dem Nutzer während des Tragens der Brille die Möglichkeit zu geben, seine Umgebung zu kontrollieren, sind an der Vorderseite der Brille zwei Kameras angebracht. Deren Bild kann bei Bedarf auf die Displays übertragen werden. Für das Verbinden zusätzlicher Sensoren mit dem HMD verfügt dieses über einen Mini-USB-Anschluss. Die Verbindung zum PC erfolgt, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, über die LinkBox oder ein WLAN-Modul [Vive, 2020].

Für die Positionsbestimmung der Brille befinden sich Infrarotempfänger in der Brille. Die Bauform der Hülle lässt darauf schließen, dass 31 Empfänger verbaut sind. Laut den Aussagen von Allan Yates, dem Entwickler des Lighthouse-Systems, ist davon auszugehen, dass sich in der Brille, wie auch in den anderen Komponenten, eine IMU befindet [Yates, 2016].

3.2.2 Controller

Der Controller (Abbildung 3.3) dient als drahtloses Ein- und Ausgabemodul zur Interaktion mit der VR. Über ein Multifunktions-Trackpad und einen zweistufigen Trigger kann der Nutzer Funktionen in der VR bedienen. Zur Ausgabe besteht eine Funktion für haptisches HD-Feedback [Vive, 2020]. Die Position der Controller wird über 24 Infrarotempfänger und eine IMU bestimmt [Yates, 2016].

3.2.3 Tracker

Der Tracker (Abbildung 3.4) bietet die Möglichkeit, zusätzlich zu den originalen Komponenten weitere Objekte in die VR einzubinden. Um externen Entwicklern die Möglichkeit zu geben, Hardware für das HTC Vive-System herzustellen, hat HTC (2018) DEVELOPER GUIDELINES veröffentlicht. Die folgenden Informationen sind, wenn nicht anders angegeben, daraus übernommen.



Abbildung 3.4: Tracker Vergleich original und mit geöffnetem Gehäuse [Bauer, Jost und Lienhart, 2020]

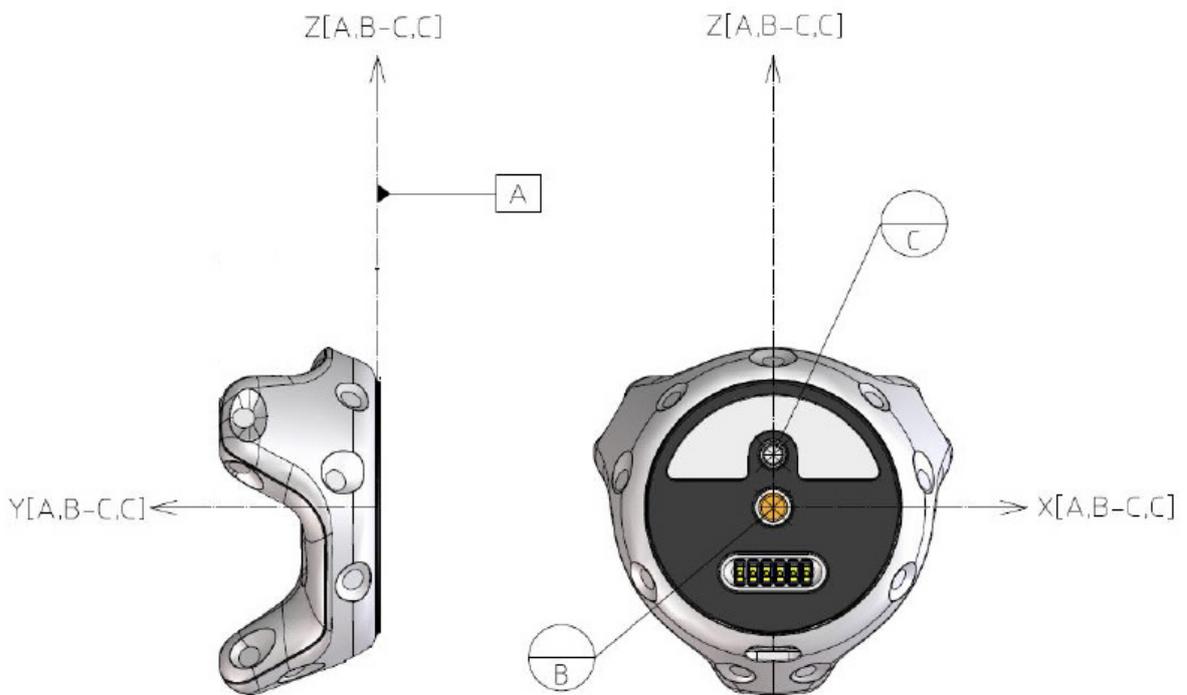


Abbildung 3.5: Tracker Achsdefinition [HTC, 2018]

Um die Daten des Trackers an den PC zu senden, ist für jeden Tracker ein Vive Dongle erforderlich. Externe Hardware kann entweder über den USB-Anschluss des Trackers oder die Federkontaktstecker an der Unterseite des Trackers angeschlossen werden. Die Daten der Zusatzhardware werden dadurch gemeinsam mit den Messdaten des Trackers an das System übertragen. Die mechanische Verbindung der Zusatzhardware erfolgt über eine nach ISO 1222:2010 genormte Kombination aus einer 1/4 Zoll Schraube und einer Verriegelungseinheit. Diese Kombination wird auch bei den gängigen Kamerasystemen verwendet. Über das Zentrum des Schraubgewindes und der Ebene der Grundplatte ist, wie in Abbildung 3.5 ersichtlich, das Koordinatenzentrum des Trackers definiert. Bei der Achsdefinition ist hervorzuheben, dass die Vertikalkomponente nicht, wie geodätisch üblich, in der Z-Achse liegt, sondern dass sie mittels der Y-Achse beschrieben wird. Ein weiterer Unterschied zu geodätischen Anwendungen ist die Tatsache, dass es sich um ein Rechtssystem handelt.

Im Zuge der Untersuchung des Systems wurde ein Tracker geöffnet. Beim Vergleich der Hülle und der Photodioden fällt auf, dass sich unter einem der konischen Einlässe kein Sensor befindet (Abbildung 3.4). Somit sind nur 22 und nicht wie, das Gehäuse vermuten lässt, 23 Sensoren verbaut. Bei den verbauten Empfängern handelt es sich laut Bezmalinovic (2018) um einen TS4231 ASIC Light-to-Digital-Converter der 2. Generation von Triad (2016). Es ist davon auszugehen, dass bei Controller und Brille die selben Sensoren verwendet werden. In den DEVELOPER GUIDELINES wird, zumindest für die Tracker, das Vorhandensein einer IMU bestätigt [HTC, 2018, S.16].

3.2.4 Lighthouse

Da das grundlegende Funktionsprinzip der Positionsbestimmung anhand der Lighthouses der ersten Generation (HTC VIVE) leichter zu verstehen ist, werden auch diese hier kurz beschrieben. Anschließend wird auf die Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Generation eingegangen. Die Komponenten (Brille, HMD und Controller) der Pro Serie funktionieren grundsätzlich mit beiden Generationen. Allerdings sind bei der Kombination mit Lighthouses der ersten Generation nicht alle Features verfügbar. Für die Untersuchungen in Kapitel 4 wurden aus diesem Grund nur die Lighthouses der zweiten Generation verwendet.

3.2.4.1 Lighthouses der 1. Generation

Bei den Lighthouses der 1. Generation handelt es sich, wie in Abbildung 3.6 ersichtlich ist, um einen Würfel mit ca. 7 cm Kantenlänge. An der Unterseite befindet sich ein 1/4 Zoll Kameragewinde zur Befestigung der Lighthouses auf Stativen. Über das zweite Kameragewinde an der Rückseite kann mithilfe spezieller Adapter auch eine Montage an der Wand erfolgen. Neben dem Kameragewinde verfügt die Rückseite der Lighthouses über einen Anschluss für die Stromversorgung, eine 3.5 mm Klinke-Buchse und eine Mini-USB-Buchse. Der Klinkenanschluss wird für die Verbindung des Sync-Kabels verwendet. Der USB-Anschluss ist für das Übertragen von Firmwareupdates vorgesehen. In der Abbildung 3.6 ist ein Lighthouse zu sehen, bei welchem die Frontabdeckung entfernt wurde. Im Bereich links oben ist ein LED-Array zu sehen. Mittig darüber befindet sich die Statusleuchte. Im Normalbetrieb leuchtet diese grün. Wird das Lighthouse bewegt, und liefert somit keine korrekten Daten, verändert wird die Statusleuchte blau. Das Erkennen der Bewegung der Lighthouses weist darauf hin, dass auch in den Lighthouses eine IMU verbaut sein könnte. In der Abbildung 3.6 sind im geöffneten Lighthouse rechts und unten mittig die sogenannten FLY WHEELS zu erkennen. Diese rotierenden Zylinder verfügen über spezielle Linsen, um gerichtete Lasersignale auszusenden. Die Zylinder drehen sich mit einer Frequenz von 60 Hz und sind mit den Linsen gegengleich ausgerichtet. Somit ist jeweils nur ein Strahl sichtbar und das Lighthouse, als Gesamtsystem, gibt von einem Punkt im Raum aus betrachtet Lasersignale mit einer Frequenz von 120 Hz ab. Die emittierten

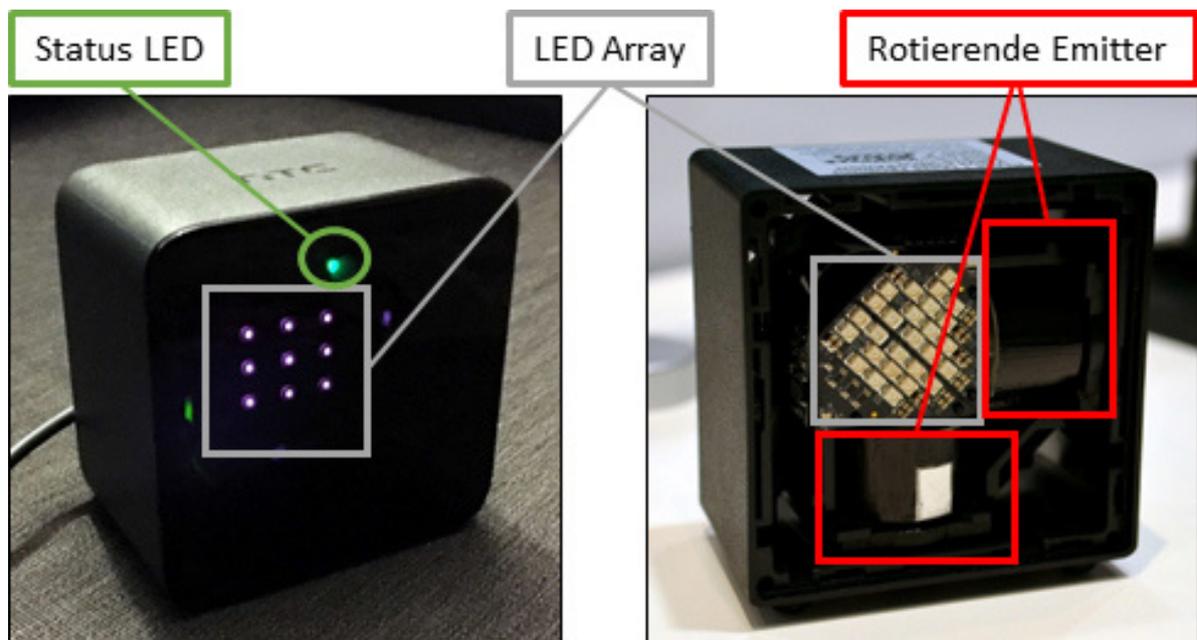


Abbildung 3.6: Vergleich originales und geöffnetes Lighthouse der 1. Generation [Lang, 2017]

Strahlen streifen orthogonal aufeinander durch den Raum. Bezogen auf das Lighthouse Koordinatensystem sind sie horizontal und vertikal ausgerichtet. [Kreylos, 2016]. Laut HTC beträgt der Sichtbereich des Lighthouses in beide Achsen 120 Grad [Vive, 2020]. Die Orientierung der Signale wird ähnlich dem in Kapitel 2.5 beschriebenen VOR-Prinzip bestimmt. Vor jedem rotierenden Signal wird über das LED-Array der Nulldurchgang dieser Rotation angezeigt. Dieser LED-Beam wird neben der Zeitsynchronisation auch für die Identifikation der Lighthouses und des aktuellen Lasersignals verwendet. Technisch wird dies mit der Aussendung eines modulierten Signals umgesetzt [nairol, 2017]. Um ein Interferieren der Signale durch die Verwendung von zwei Lighthouses zu verhindern, müssen sich die Lighthouses aufeinander abstimmen. Die Synchronisation erfolgt über ein Sync-Kabel [Vive, 2020]. Nach der Synchronisation der beiden Lighthouses stimmen diese sich beim Aussenden der Signale ab. Die Zylinder der Lighthouses rotieren weiterhin mit derselben Frequenz, der Laser wird allerdings für jede zweite Runde abgeschaltet. Somit ergibt sich die in Abbildung 3.7 gezeigte Abfolge. Die Dauer des LED-Beams beträgt laut Hudson (2017) ca. $100 \mu\text{s}$ und wird auf allen Lighthouses zur selben Zeit ausgesandt. Die rotierenden Signale sind laut Hudson für ca. 8.33 ms aktiv. Von einem bestimmtem Standpunkt im Raum aus betrachtet ist das Signal nur für einen Bruchteil der angegebenen Zeit sichtbar.

3.2.4.2 Lighthouses der 2. Generation

Die Lighthouses der 2. Generation sind seit dem ersten Quartal 2018 erhältlich [Bezmalinovic, 2018]. Vergleicht man diese mit denen der ersten Generation, fällt bereits von außen die geänderte Form auf. Die bei der Vorgängerversion flache Frontscheibe ist in der 2. Version gekrümmt. Bei den Anschlüssen auf der Rückseite hat sich nichts verändert. Laut der Homepage von Vive (2020) ist aber die Verwendung eines Sync-Kabels nicht mehr notwendig. Betrachtet man das in Abbildung 3.8 dargestellte geöffnete Lighthouse der 2. Generation, ist zu erkennen, dass anstelle der zwei FLY WHEELS nur mehr ein Rotationszylinder verbaut wurde. Auch das für den LED-Beam verantwortliche LED-Array ist nicht mehr vorhanden. Anstelle der horizontalen und vertikalen Laserlinien werden in der neuen Generation V-förmige Linien in den Raum gestrahlt (Abbildung 3.9). Dies erfolgt über zwei schräg angebrachte Linsen am Rotationszylinder. Da von Valve, der

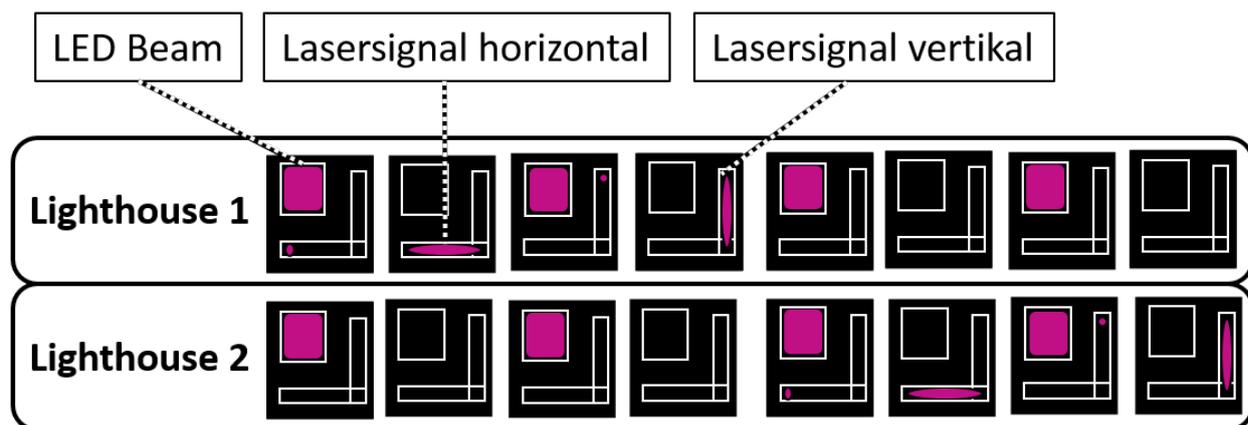


Abbildung 3.7: Abfolge der Signale der Lighthouses 1. Generation

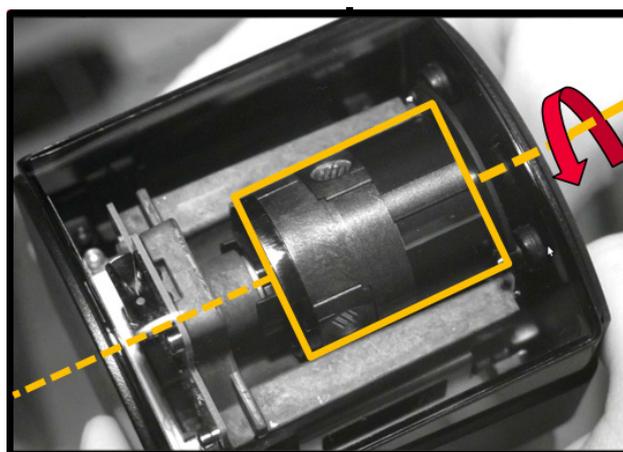


Abbildung 3.8: Lighthouse der 2. Generation mit geöffneter Front [Bauer, Jost und Lienhart, 2020]

Firma, die die Lighthouses entwickelt und produziert, bis heute nicht preisgegeben wurde, wie der Wegfall des LED-Arrays im Detail ersetzt wurde, werden dazu im Internet verschiedene Vermutungen aufgestellt. Auf der GitHub-Seite des Projekts EPSTRACKER, einem Projekt, welches zum Ziel hat, einen eigenen Lighthouse-basierten Tracker zu bauen, wird vermutet, dass die Information über die Ausrichtung des rotierenden Emitters und die ID des Lighthouses über ein lineares rückgekoppeltes Schieberegister auf das rotierende Signal aufmoduliert wird. Bei der Modulation handelt es sich laut r2x0t (2018) um eine Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)-Modulation, ähnlich der Modulation von GPS. Da aber im Vergleich zu GPS die Ausgangssignale der Modulation nicht bekannt sind, können die Signale nur von den originalen IR-Rezeptoren decodiert werden. Anstelle der Sync-Kabel verfügen die Lighthouses der zweiten Generation über eine Photodiode. Mit dieser werden die Signale der anderen Lighthouses empfangen. Bei der Verwendung mehrerer Lighthouses müssen diese auf unterschiedliche Channels gelegt werden. Sind die Einstellungen falsch, wird eine Warnung ausgegeben und das System berechnet keine Lösung. In den Einstellungen von SteamVR stehen 16 Channels zur Verfügung. Es gibt aber keine Bestätigung, dass ein gleichzeitiger Betrieb von 16 Lighthouses schon funktioniert. Laut dem GitHub-Nutzer j davidberger (2019) unterscheiden sich die einzelnen Channels nicht nur durch die Modulation, sondern auch durch die Rotationsfrequenz des Metallzylinders. Laut ihm liegen die Rotationsfrequenzen in einem Bereich zwischen 50.0521 HZ (Channel 1) und 54.1150 Hz (Channel 16). Das würde bedeuten, dass bei Verwendung von nur einem Lighthouse, die Frequenz der optischen Positionsupdates geringer

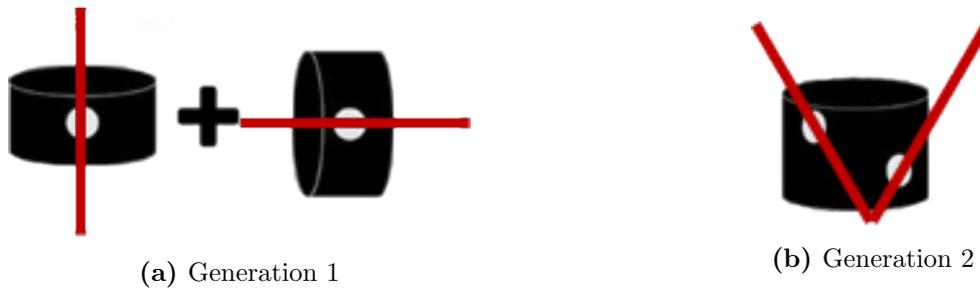


Abbildung 3.9: Vergleich der Rotationszylinder und Lasersignale der Lighthousegenerationen, angelehnt an Bezmalinovic (2018)

ist als in der Vorgängerversion. Durch die unterschiedlichen Frequenzen der Lighthouses, müssen diese aber nicht mehr nacheinander ein und ausgeschaltet werden. Somit ist die Verfügbarkeit von optischen Signalen für den Empfänger insgesamt gestiegen.

3.3 Funktionsprinzip der Positionsbestimmung

Aufgrund der Tatsache, dass die Verwendung mehrerer Lighthouses primär zur Erweiterung des Nutzungsbereichs, und nicht zur Steigerung der Genauigkeit, beworben wird, wird im folgenden Kapitel der Ansatz der Positionsbestimmung der Devices ausgehend von einem Lighthouse betrachtet. Im zweiten Teil wird anschließend beleuchtet, welche Verbesserungen theoretisch zu erwarten sind, wenn ein weiteres Lighthouse gleichzeitig Sichtkontakt zum Device hat. Die im Folgenden beschriebene Funktionsweise stützt sich rein auf die Analyse der vorhandenen Funktionsbeschreibungen der Lighthouses und damit mögliche Berechnungsverfahren aus der Literatur. Die Korrektheit sowie Vollständigkeit der Informationen wurde weder vom Hersteller bestätigt noch wird sie vom Autor dieser Arbeit garantiert.

Vergleicht man die Funktionsbeschreibung der Lighthouses im Kapitel 3.2.4 mit der Beschreibung des Funktionsprinzips der VOR-Beacons in Kapitel 2.5, sind speziell bei der 1. Generation der Lighthouses einige Parallelen im Funktionsprinzip erkennbar. Der erste Schritt ist die Bestimmung der Ausrichtung vom Lighthouse zum IR-Rezeptor. Da es sich beim System von Valve, anders als bei den VOR-Beacon und Leuchttürmen, um ein dreidimensionales System handelt, ist dies doch komplexer als bei den Leuchttürmen.

3.3.1 Bestimmung der Sichtlinie zum Rezeptor

Durch den unterschiedlichen Aufbau gibt es bei der Bestimmung der Sichtlinie grundlegende Unterschiede zwischen der 1. und 2. Generation. Aus diesem Grund werden beide Varianten beschrieben. Das Ziel ist bei beiden Systemen den dreidimensionalen Richtungsvektor vom Lighthouse zu allen IR-Rezeptoren einzeln zu bestimmen.

3.3.1.1 Lighthouses 1. Generation

Bei den Lighthouses der ersten Generation wird nacheinander die vertikale und horizontale Komponente (ausgehend vom Lighthousekoordinatensystem) betrachtet. Durch die Zeitdifferenz zwischen dem Beam des LED-Arrays und dem Empfangen des rotierenden Signals kann die Ausrichtung der beiden Ebenen, welche sich im Zentrum des IR-Rezeptors schneiden, bestimmt werden (Abbildung 3.10). Für die Berechnung des Richtungsvektors wird angenommen, dass die Rezeptoren sich in der Zeit zwischen dem Auftreffen der Signale nicht bewegt haben. Der Fehlereinfluss einer Bewegung hängt von der Geschwindigkeit dieser im Verhältnis zur Drehrate der IR-Signale ab und wird in den weiteren Berechnungen vernachlässigt.

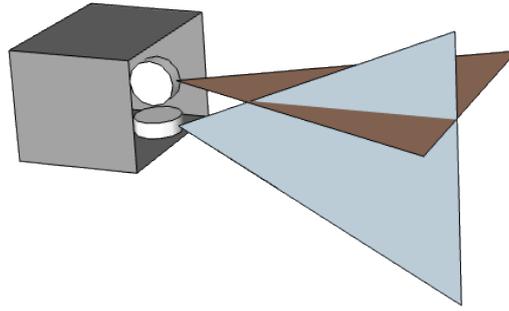


Abbildung 3.10: Ebenen der Rotationsemitter beim Lighthouse der 1. Generation

3.3.1.2 Lighthouses 2. Generation

Bei den Lighthouses der 2. Generation werden, wie beschrieben, nicht mehr zwei separate FLY WHEELS verwendet. Die V-förmige Anordnung lässt unter den Annahmen, dass

- die Rotationsachse des Zylinders in der Vertikalachse des Koordinatensystems des Lighthouses liegt und
- die Schnittlinie der projizierten Ebenen orthogonal auf die Rotationsachse des Zylinders ist,

folgendes Funktionsprinzip vermuten:

Das Funktionsprinzip ähnelt dem eines Neigungssensors einer Totalstation, welcher mit einem V-förmigen Signal und einem Zeilensensor arbeitet [Zogg et al., 2009]. Anstelle des Zeilensensors wird im Fall der Lighthouses ein punktueller Sensor verwendet. In der Abbildung 3.11 ist die Bestimmung des Horizontal- und Vertikalwinkels vom Lighthouse zu einem Rezeptor am Device skizziert. Für die Bestimmung des Horizontalwinkels werden, wie in der Formel 3.1 beschrieben, die Ausrichtungen des Zylinders beim Auftreffen des ersten bzw. zweiten Signals am Rezeptor verwendet (β_{t1} und β_{t2}). Durch den symmetrischen Aufbau des Signals liegt der Rezeptor genau in der Mitte zwischen den beiden Basispunkten des ausgestrahlten V-förmigen Signals.

$$\beta_R = \beta_{t1} + \frac{1}{2} \cdot (\beta_{t1} - \beta_{t2}) \quad (3.1)$$

Für die Bestimmung des Vertikalwinkels wird die Größenordnung der Differenz zwischen den beiden Ausrichtungen des Emitters verwendet (Formel 3.2). Je höher der Rezeptor im Vergleich zum Basispunkt des ausgesendeten V-förmigen Signals liegt, umso größer ist die Differenz zwischen den beiden Winkelwerten β_{t1} und β_{t2} . Diese Winkel beschreiben, wie auch zuvor, die Ausrichtung des Zylinders zum Zeitpunkt des Empfanges am Rezeptor. In der Formel 3.3 wird der Zusammenhang zwischen der Winkeldifferenz und der Basislänge ($2 \cdot x$) des gleichschenkligen Dreiecks mit der Höhe h hergestellt. Um diese Höhe zu bestimmen, wird in der Formel 3.4 die Neigung der Signalebenen eingeführt. Der Wert für α_{Ebene} ist durch die Hardware vorgegeben. Im nächsten Schritt wird die Formel 3.3 in die Formel 3.4 eingesetzt. Der dadurch erhaltene Zusammenhang zwischen h , dem Differenzwinkel α_V und der Distanz d wird anschließend in die Formel für den Vertikalwinkel (Formel 3.5) eingesetzt. Dadurch fällt die Distanz d zwischen dem Koordinatenursprung im Lighthouse und dem Rezeptor heraus. Das Ergebnis ist die Formel 3.6. Als Eingangsgröße für die Berechnung des Vertikalwinkels wird nur der Differenzwinkel der Horizontalwinkel benötigt.

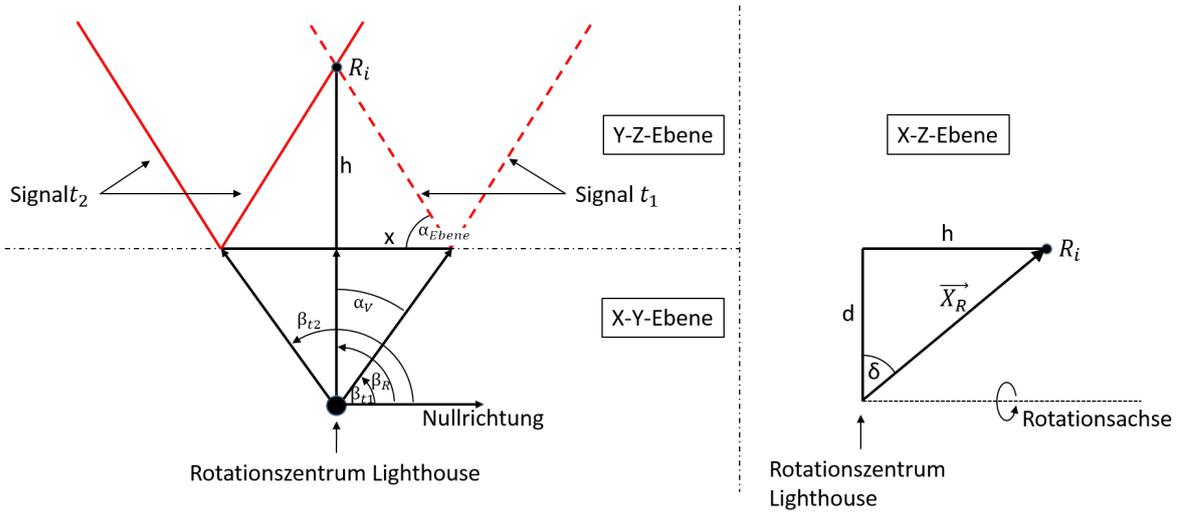


Abbildung 3.11: Berechnungsprinzip des Richtungsvektors vom Lighthouse zu einem Rezeptor

$$\alpha_V = \frac{1}{2} \cdot (\beta_{t2} - \beta_{t1}) \quad (3.2)$$

$$x = \cot(90 - \alpha_V) \cdot d \quad (3.3)$$

$$h = x \cdot \tan(\alpha_{Ebene}) \quad (3.4)$$

$$\tan \delta_R = \frac{h}{d} \quad (3.5)$$

$$\delta_R = \tan^{-1}(\cot(90 - \alpha_V) \cdot \tan \alpha_{Ebene}) \quad (3.6)$$

In Formel 3.7 werden nun β_R und δ_R eingesetzt, um den Zusammenhang zum normierten Richtungsvektor herzustellen.

$$\vec{n}_r = \frac{\vec{X}_R}{|\vec{X}_R|} = \begin{pmatrix} \cos(\delta_R) \cdot \cos(\beta_R) \\ \cos(\delta_R) \cdot \sin(\beta_R) \\ \sin \delta_R \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

3.3.2 Bestimmung der Distanz zum Device

Wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, kann anhand der Messungen zu einem IR-Rezeptor der normierte Richtungsvektor vom Lighthouse zum einzelnen Rezeptor bestimmt werden. Eine Distanzmessung zu einem einzelnen Empfänger ist nicht möglich. Aus diesem Grund wird für die Distanzbestimmung zu den Devices eine zusätzliche Information benötigt. Der Hersteller gibt an, dass immer mindestens fünf Dioden im Sichtbereich des Lighthouses liegen müssen. Daher liegt die Vermutung nahe, dass die benötigte zusätzliche Information die Lage der Photodioden zueinander ist. Einen solchen Ansatz verfolgt auch der von der NASA entwickelte Tracking Algorithmus für die Lighthouses der 1. Generation, welcher 2018 publiziert wurde [Borges et al., 2018].

3.3.2.1 Geometrischer Ansatz

Zum leichteren Verständnis wird der geometrische Ansatz beispielhaft im zweidimensionalen Raum gezeigt. Im Unterschied zur dreidimensionalen Lösung stützt sich die Berechnung nur auf die Infor-

mationen über die Horizontalwinkel β_{Ri} zu den einzelnen IR-Rezeptoren. Die Punkte 1, 2, 3 in der Abbildung 3.12 bezeichnen diese Dioden. Die Strecken S_{12}, S_{13} und S_{23} sowie die Winkel in dem von den drei Punkten aufgespannten Dreieck sind durch die Hardware vorgegeben. Aus den vorangegangenen Berechnungen für β_{Ri} werden die Innenwinkel α_{ij} der Dreiecke, die von dem Lighthouse und den Dioden aufgespannt werden, abgeleitet. Somit bleiben in der Skizze die Strecken S_{Li} als zu bestimmende Unbekannten.

Um diese zu bestimmen, wird im ersten Schritt ein Collin'scher Hilfspunkt P eingeführt. Dieser Hilfspunkt wird festgelegt als Schnittpunkt des Kreises, welcher durch zwei bekannte Punkte (1 und 3) und den Neupunkt (L) definiert ist, mit der Geraden durch den Neupunkt (L) und einem dritten bekannten Punkt (2) [Schulte und Löhr, 1941]. Danach folgen 5 Dreiecksauflösungen, für welche die laut Literatur zugehörigen Ansätze in der Tabelle 3.1 aufgelistet sind [Sigl, 1977].

Tabelle 3.1: Lösungsansätze für den geometrischen Ansatz der Distanzberechnung

Eckpunkte des Dreiecks	bekannte Parameter	gesuchte Parameter	Berechnungsansatz
1 - 3 - H	$S_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{12}$	S_{1H}, S_{3H}	2 x Sinussatz
2 - H - 3	$(\alpha_3 + \alpha_{12}), S_{23}, S_{3H}$	S_{2H}, ρ	Cosinussatz und Sinussatz
L - H - 3	$S_{3H}, \rho, \alpha_{23}$	S_{L3}	Sinussatz
L - 2 - 3	$S_{L3}, S_{23}, \alpha_{23}$	S_{L2}	2 x Sinussatz
L - 1 - 2	$S_{L2}, S_{12}, \alpha_{12}$	S_{L1}	2 x Sinussatz

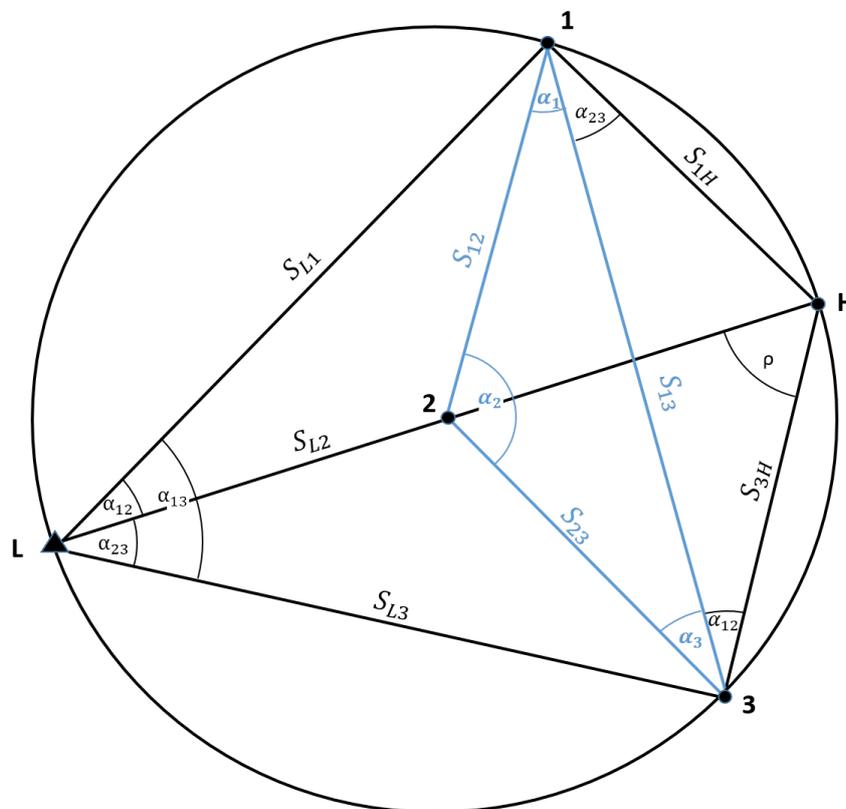


Abbildung 3.12: Skizze des geometrischen Ansatzes zur Bestimmung der Distanz

3.3.2.2 Lösung mittels Gleichungssystem

Da der geometrische Ansatz für die Lösung des Distanzproblems im dreidimensionalen Raum deutlich aufwändiger ist als im zweidimensionalen, wurde dafür der Ansatz über die Aufstellung eines Gleichungssystems gewählt.

Für die Aufstellung des Zusammenhangs zwischen bekannten und unbekanntem Parametern werden zwei lokale Koordinatensysteme eingeführt. Die zugehörigen theoretischen Ausführungen sind in Kapitel 2.4 zu finden. Als erstes wird das übergeordnete System, bezeichnet mit X^{LH} , aufgestellt. Der Ursprung liegt im Zentrum des Lighthouses. Als Z-Achse wird die Rotationsachse des Zylinders definiert. Die beiden verbleibenden Achsen definieren sich über die Blickrichtung des Lighthouses. Beim zweiten Koordinatensystem handelt es sich um das Bodysystem des Devices. Eine beispielhafte Definition dieses Systems findet sich in der Beschreibung des Trackers in Kapitel 3.2.3. Eine solche Definition kann analog dazu für alle weiteren Devices bestimmt werden. Die beiden Koordinatensysteme werden im Folgenden mittels der hochgestellten Bezeichnungen X^{LH} (Lighthouse) und X^{B} (Bodysystem des Devices) dargestellt. Bei beiden Systemen handelt es sich um Koordinatensysteme mit mathematisch positivem Drehsinn.

Im Lighthouse-System sind neben dem Zentrum des Lighthouses auch die orientierten Richtungen β_i und der Vertikalwinkel δ_i bzw. der daraus resultierende normierte Richtungsvektor (Formel 3.7) für jeden sichtbaren IR-Rezeptor bekannt. Der Richtungsvektor wird benötigt, um die Geradengleichung der beobachteten Dioden aufzustellen (Formel 3.9). Pro beobachteter Diode und daraus resultierender Gleichung wird eine unbekannte Distanz d_i eingeführt.

Im Bodysystem des Devices ist neben dem definierten Zentrumspunkt $X_{D_0}^{\text{B}}$ auch die Lage der Dioden $X_{R_i}^{\text{B}}$ bekannt. Der Zusammenhang zwischen den Punkten im Bodysystem ist in Formel 3.11 beschrieben.

Um die Bestimmung der Devicekoordinaten und die Ausrichtung im Verhältnis zum Lighthouse zu bestimmen, wird in Formel 3.12 der Übergang des Devicezentrums vom Bodysystem in das Lighthousesystem beschrieben. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, werden dafür die Rotationsmatrix $R(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$, in Abhängigkeit der drei Rotationswinkel, und die Translation entlang der drei Achsen $\vec{x}_{\text{B}}^{\text{LH}}$ als Unbekannte eingeführt. Der Maßstab wird vernachlässigt, da dieser mit $m = 1$ angenommen wird. Anschließend wird der Zusammenhang aus Formel 3.11 in die Formel 3.12 eingesetzt. Dadurch entsteht ein Zusammenhang zwischen der Devicekoordinate im Lighthousesystem und den relativen Differenzen im Bodysystem. Diese Gleichung wird im letzten Schritt mit der in Formel 3.9 definierten Geradengleichung gleichgesetzt. Als unbekanntem Parameter treten in der resultierenden Formel 3.13 die drei Rotationswinkel $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, die dreidimensionale Verschiebung $\vec{x}_{\text{B}}^{\text{LH}}$ und die Distanz zwischen Lighthouse und der Einzeldiode d_i auf.

$$L_0^{\text{LH}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$$X_{R_i}^{\text{LH}} = L_0^{\text{LH}} + d_i \cdot \vec{n}_i \quad (3.9)$$

$$X_{D_0}^{\text{B}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

$$X_{D_0}^{\text{B}} = X_{R_i}^{\text{B}} - \vec{\Delta}x_{D_0, R_i}^{\text{B}} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{X}_{D0}^{LH} = R(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \cdot \mathbf{X}_{D0}^B + \vec{\mathbf{x}}_B^{LH} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{L}_0^{LH} + d_i \cdot \vec{\mathbf{n}}_i = R(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \cdot (-\vec{\Delta \mathbf{x}}_{D0, Ri}^B) + \vec{\mathbf{x}}_B^{LH} \quad (3.13)$$

Wird diese Gleichung für i beobachtete Dioden aufgestellt, ergeben sich $6 + i$ unbekannte Parameter. Da es sich um ein dreidimensionales System handelt, können pro aufgestellter Gleichung drei Parameter bestimmt werden. Somit werden drei beobachtete Dioden benötigt, um das Zentrum des Devices zu bestimmen. Werden mehr als drei Rezeptoren beobachtet, kann das überbestimmte Gleichungssystem mittels einer Ausgleichsrechnung ausgewertet werden [Niemeier, 2008].

3.3.3 Genauigkeitsabschätzung der Positionsbestimmung

Die folgenden Überlegungen werden nur für das Funktionsprinzip der Lighthouses 2. Generation durchgeführt. Es wird angenommen, dass die beiden ausgesandten Ebenen mit derselben Genauigkeit aufgespannt werden. Somit ergibt sich für die Messung der Winkelwerte β_{t1} und β_{t2} aus Formel 3.1 ein gemeinsamer Fehlerterm σ_β (Formel 3.14). Aus der Varianzfortpflanzung für den Horizontalwinkel (Formel 3.15) ergibt sich daraus der Faktor 2.5 zwischen σ_R^2 und σ_β^2 .

$$\sigma_{\beta t1} = \sigma_{\beta t2} = \sigma_\beta \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \sigma_R^2 &= \left(\frac{\partial \beta_R}{\partial \beta_{t1}} \right)^2 \cdot \sigma_\beta^2 + \left(\frac{\partial \beta_R}{\partial \beta_{t2}} \right)^2 \cdot \sigma_\beta^2 \\ \sigma_R^2 &= 2 \frac{1}{2} \sigma_\beta^2 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Die Varianzfortpflanzung für den Vertikalwinkel ist aufgrund des komplizierten Formelapparates in mehrere Schritte aufgeteilt. Zuerst wird in Formel 3.17 die Varianz für α_V aus Formel 3.2 berechnet.

$$\begin{aligned} \sigma_{\delta \alpha_V}^2 &= \left(\frac{\partial \delta \alpha_V}{\partial \beta_{t1}} \right)^2 \cdot \sigma_\beta^2 + \left(\frac{\partial \delta \alpha_V}{\partial \beta_{t2}} \right)^2 \cdot \sigma_\beta^2 \\ \sigma_{\delta \alpha_V}^2 &= \frac{1}{2} \sigma_\beta^2 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Anschließend wird der Zusammenhang für δ_R aus Formel 3.6 betrachtet. Die fehlerhaften Terme in diesem Zusammenhang sind die Winkel α_R und α_{Ebende} . Aus dem maximalen Öffnungswinkel der Lighthouses von 120° in vertikaler Richtung ergibt sich bei einem maximalen Abstand von 6 m eine theoretische Maximalhöhe des V-förmigen Signals im Raum von 20,8 m. Nimmt man für die Verkippung der Ebenen zueinander $\alpha_{Ebene} = 60^\circ$ an, lässt sich daraus ein Maximalwert für α_V von 75° berechnen. Setzt man nun die Werte für $0^\circ < \alpha_V < 75^\circ$ und $\alpha_E = 60^\circ$ in die Formeln 3.19 und 3.18 ein, erhält man die maximalen Werte für die partiellen Ableitungen, welche in Formel 3.21 eingesetzt sind.

$$\sigma_{\delta_R}^2 = \left(\frac{\partial \delta_R}{\partial \alpha_V} \right)^2 \cdot \sigma_{\alpha_V}^2 + \left(\frac{\partial \delta_R}{\partial \alpha_{Ebene}} \right)^2 \cdot \alpha_{Ebene}^2 \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial \delta_R}{\partial \alpha_V} = \frac{\tan \alpha_{\text{Ebene}}}{\cos^2(90 - \alpha_V) \cdot \tan \alpha_{\text{Ebene}} + \sin^2(90 - \alpha_V)} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \delta_R}{\partial \alpha_E} = \frac{\cot(90 - \alpha)}{\cot^2(90 - \alpha_V) \cdot (1 - \cos \alpha_{\text{Ebene}}) + \cos^2 \alpha_{\text{Ebene}}} \quad (3.19)$$

$$\sigma_{\delta_R}^2 = 3 \cdot \sigma_{\alpha_V}^2 + 2 \cdot \alpha_{\text{Ebene}}^2 \quad (3.20)$$

Setzt man anschließend das Ergebnis aus Formel 3.17 ein, zeigt sich in Formel 3.21 der Zusammenhang der Varianzen von δ_R , β und α_{Ebene} .

$$\sigma_{\delta_R}^2 = 1,5 \cdot \sigma_{\beta}^2 + 2 \cdot \alpha_{\text{Ebene}}^2 \quad (3.21)$$

Für die Genauigkeitsabschätzung der Distanz zwischen Lighthouse und Device wird auf den geometrischen Ansatz aus Kapitel 3.3.2.1 zurückgegriffen. Unter der Annahme, dass die Winkel im Dreieck wie oben beschrieben bestimmt werden können, leitet sich die Distanz zwischen Lighthouse und Device von den Basislinien zwischen den Dioden ab. In Abbildung 3.13 ist die Ausgangslage der folgenden Überlegungen grafisch dargestellt. Die Einflüsse der Bestimmung der Winkel werden vernachlässigt, und die Winkel werden als bekannt angenommen.

Der Wertebereich für die Distanzen zwischen Lighthouse und Device ist vom Hersteller in den Konfigurationen der Lighthouses angegeben. Der Wertebereich für die Distanz zwischen den Dioden d_D ergibt sich aus dem Aufbau des Trackers.

$$0,5 \text{ m} \leq d_i \leq 6 \text{ m}$$

$$0,015 \text{ m} \leq d_D \leq 0,08 \text{ m}$$

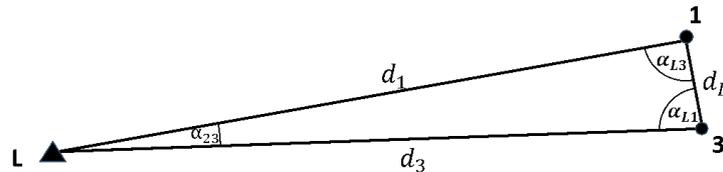


Abbildung 3.13: vereinfachte Darstellung des Geometrischen Ansatzes

Die Distanz d_i kann unter den getroffenen Annahmen mit der Formel 3.22 berechnet werden. Wenn man den Einfluss der Ungenauigkeiten der Winkelmessung vernachlässigt, und nur d_D als fehlerbehaftet betrachtet, ergibt sich die in Formel 3.23 angegebene Varianzfortpflanzung.

$$d_i = \frac{d_D}{\sin(\alpha_{ij})} \cdot \sin(\alpha_{Li}) \quad (3.22)$$

$$\sigma_{d_i}^2 = \left(\frac{\sin(\alpha_{Li})}{\sin(\alpha_{ij})} \right)^2 \cdot \sigma_{d_D}^2 \quad (3.23)$$

Aus den Wertebereichen für d_i und d_D lassen sich die Wertebereiche für α_{ij} ableiten. Die Lage der Dioden zueinander ist nicht eingeschränkt.

$$\begin{aligned} 0,1^\circ &\leq \alpha_{ij} \leq 9^\circ \\ 0^\circ &\leq \alpha_{Li} \leq 360^\circ \end{aligned}$$

Setzt man diese Wertebereiche nun in die Formel 3.23 ein, erhält man für den Zusammenhang zwischen σ_{d_i} und σ_{d_D} bei einer Verdrehung von $\alpha_{Li} = 20^\circ$ einen maximalen Faktor von 572. Setzt man bei derselben Verdrehung voraus, dass die beiden Dioden die maximale Entfernung aufweisen, kommt es immer noch zu einem Faktor von 6,4.

Geht man von einer theoretischen Fertigungsgenauigkeit von 0.1 mm aus, bedeutet dies ein σ_{d_i} im Bereich von 0.6 mm bis 57 mm. Es ist davon auszugehen, dass die Ungenauigkeit mit der Entfernung zunimmt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Bestimmung der Entfernungskomponente aufgrund des Berechnungsverfahrens stärker fehlerbehaftet ist als die Bestimmung von Vertikal- und Horizontalwinkel. Lässt man die Genauigkeit der Verkippung der Ebene außer Acht, ist davon auszugehen, dass die Bestimmung des Horizontalwinkels um den Faktor 1.6 ungenauer erfolgt als die des Vertikalwinkels. Die Berechnung von absolut zu erwartenden Genauigkeitsbereichen ist aufgrund des Fehlens der Eingangsgrößen nicht möglich.

3.3.4 Möglichkeiten durch die Verwendung eines zweiten Lighthouses

Da aus den zuvor genannten Gründen davon auszugehen ist, dass die Richtungsmessung mit einer höheren Genauigkeit erfolgt als die Distanzmessung, könnte bei der Verwendung von zwei Lighthouses eine Verbesserung erzielt werden. In diesem Fall müsste anstelle der Distanzbestimmung ein Vorwärtsschnitt mit Richtungen durchgeführt werden.

4 Praktische Untersuchung des Systems HTC Vive Pro

In diesem Kapitel wird zuerst auf die verwendeten Referenzsysteme und sonstige verwendete Hardware eingegangen. Bevor die Beschreibung der Messaufbauten erfolgt, wird die verwendete Software für die Ansteuerung der Referenzsysteme und das Auslesen der Messergebnisse beleuchtet. Da es im Zuge der Arbeit zu mehreren komplett unterschiedlichen Messaufbauten gekommen ist, sind die Methoden der Auswertung und die Ergebnisse der einzelnen Versuche direkt nach deren Beschreibung angeführt.

4.1 Beschreibung der verwendeten Komponenten

Für die Untersuchungen wurde das HTC VIVE Pro System des IGMS verwendet. Zusätzlich wurden von Magna noch zwei Tracker und ein Lighthouse zur Verfügung gestellt. In der Tabelle 4.1 sind die verwendeten Komponenten angeführt. Die hier angegebenen Kurzbezeichnungen werden wie hier eingeführt in der folgenden Beschreibung verwendet.

Tabelle 4.1: verwendete Komponenten

Bezeichnung	Devicetyp	Seriennr.	Bezeichnung SteamVR
HMD	Display	-	LHR-E5902FCD
K1	Controller	-	LHR-DE80E7F2
K2	Controller	-	LHR-C0929F77
TR TU	Tracker	FA883AL00064	LHR-F25D09AB
TR M1	Tracker	FA882AL02295	LHR-E258CE89
TR M2	Tracker	FA882AL02284	LHR-9AD70878
LH1	Lighthouse	FB820001F8	LHB-59D95DA5
LH2	Lighthouse	FB82300C36	LHB-9FDF0F6A
LH3	Lighthouse	FB82801FF6	LHB-F20172AC

4.2 Grundsetup der Messungen

In diesem Abschnitt werden die Rahmenbedingungen, wie Messumgebung, Referenzsysteme und Ansteuerung der durchgeführten Überprüfungen, beschrieben.

4.2.1 Messumgebung

Alle im Folgenden angeführten Messungen wurden im Messlabor des IGMS durchgeführt. Das Labor wird unter anderem auch für Kalibrierungen von geodätischen Messgeräten nach dem ISO-Standard aus der Gruppe TC172/SC06 verwendet. Die Temperatur im Labor beträgt konstant $20.0^\circ \pm 0.5^\circ$ und die Luftfeuchtigkeit ist mit $50\% \pm 10\%$ eingestellt. Wie in Abbildung 4.1 ersichtlich ist, hat das Labor eine Größe von 33 m x 6,5 m und die Raumhöhe beträgt 3,5 m. Für die Messungen stehen neben 10 Vermessungspeilern aus Stahl auch ein Vertikal- sowie ein Horizontalkomparator zur Verfügung. Die Fundamente des Labors sind vom restlichen Gebäude unabhängig und schwingungs isoliert [IGMS, 2019].

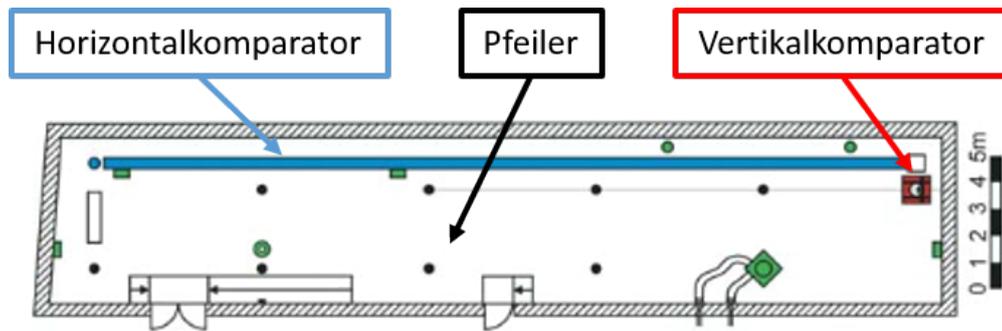


Abbildung 4.1: Übersicht des Messlabors am IGMS, angelehnt an [IGMS, 2019]

4.2.2 Referenzmesssysteme

In den verschiedenen Testmessungen, welche im Kapitel 4.3 beschrieben sind, werden unterschiedliche Systeme zur Bestimmung der Referenzwerte verwendet. Alle im Folgenden beschriebenen Systeme erfüllen die Anforderungen an ein Referenzsystem (übergeordnete Genauigkeit) in Bezug auf die zu erwartenden Genauigkeiten des VR-Systems.

4.2.2.1 Horizontalkomparator

Beim Horizontalkomparator (Abbildung 4.2) handelt es sich um eine 30 m lange Betonbank, auf der ein horizontales Schienensystem installiert ist. Laut einer Diplomarbeit, welche am IGMS 2003 durchgeführt wurde, beträgt die Maximalabweichung in der Horizontalebene unter 2 mm [Oberzaucher, 2003, S. 69]. Die Geradlinigkeit des Schienensystems wurde von Milchrahm (2014) untersucht und beträgt $\pm 0,5$ mm. Die Position des motorisierten Verschiebewagens wird mittels Laserinterferometer (HP10889B) mit einer Genauigkeit von $5/100$ mm (lt. GUM $k=2$) relativ zur Startposition bestimmt [H.Woschitz,p.K.,13.11.2019]. Die vom Nutzer vorgegebenen Positionen können mit $\pm 1/100$ mm angefahren werden. Die Ansteuerung des Verschiebewagens und die Aufzeichnungsprogramme für die Referenzpositionen wurden in einem am IGMS entwickelten LabView-Programm umgesetzt. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wurde keine der Möglichkeiten einer externen Ansteuerung verwendet. Es wurde auf den SEMI AUTOMATIC-Modus mit manuellem Input zurückgegriffen. In diesem Modus können die Sollpositionen und die Wartezeit zwischen dem Bewegen definiert werden. Am IGMS wird der Horizontalkomparator unter anderem zur Kalibrierung von EDM-Messgeräten in Totalstationen verwendet [IGMS, 2019].

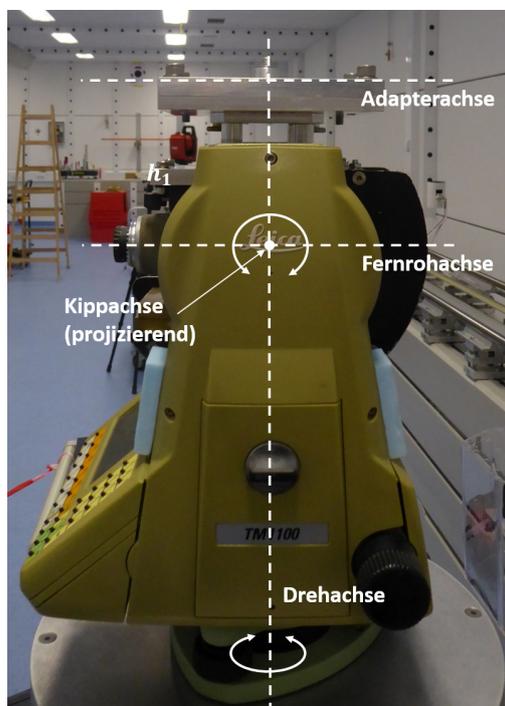


Abbildung 4.2: Horizontalkomparator

4.2.2.2 Leica TM1100 – Umbau IGMS

Bei dem verwendeten Leica TM1100 (Abbildung 4.3a) handelt es sich um einen umgebauten elektronischen, motorisierten Theodoliten. Der Bereich oberhalb des Zielfernrohres wurde so adaptiert, dass eine Montageplattform geschaffen wurde, auf welcher unterschiedlichste Geräte bzw. Teile von Messsystemen befestigt werden können. Der Umbau des Gerätes erfolgte im Zuge der Dissertation von Macheiner (2010). Durch die im Bereich unter dem Zielfernrohr angebrachten variablen Gewichte besteht zusätzlich zur Möglichkeit der horizontalen Drehung die Möglichkeit, eine Drehung um die Vertikalachse mit verschiedenen schweren Aufbauten durchzuführen. Der TM1100 wird seit dem Umbau auf dem IGMS für unterschiedliche Überprüfungen, wie z.B. Rotationstests von Prismen, eingesetzt [Lackner und Lienhart, 2016]. Die in Abbildung 4.3b abgebildete Adapteraufnahme verfügt über ein M8-Gewinde in der Mitte der Platte, welche bei korrekter Montage mit der Drehachse des TM1100 übereinstimmt. Für dieses M8-Gewinde gibt es, wie in den Abbildungen 4.3 dargestellt, Schraubadapter auf Kameragewinde sowie auf den Leica-Steckzapfen.

Für die Ansteuerung wurde auf institutsinterne Matlab-Routinen zurückgegriffen. Diese ermöglichen mithilfe von GeoCom-Befehlen eine Drehung des TM1100 in vertikaler und horizontaler Richtung. Für das Anfahren definierter Winkel gibt es von Leica keine Genauigkeitsangaben. Aus diesem Grund werden nach jeder Positionierung des TM1100 auch die tatsächlichen Werte der Ausrichtung ausgelesen und abgespeichert. Für die Richtungsmessung gibt der Hersteller eine Genauigkeit von $3''$ (1 mgon) an [Leica-Geosystems, 1998, S.240]. Diese Angabe beruht auf Messungen nach DIN 18723. Diese Norm bezieht auch das manuelle Anzielen des Nutzers mit ein. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass für die geänderte Anwendung Genauigkeiten kleiner $3''$ (1 mgon) erreicht werden können.



(a) TM1100 + Adapterplatte mit montiertem Kameragewinde



(b) Adapterplatte mit montiertem Wild Steckzapfen von oben

Quelle: IGMS

Abbildung 4.3: Leica TM1100 - Umbau IGMS inkl. Adapterplatte

4.2.3 Zusätzliche Hardware

Zusätzlich zu den beschriebenen Referenzsystemen wurde weitere Hardware für die Untersuchungen benötigt. Der Aufbau und die Funktionen dieser zusätzlichen Komponenten wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

4.2.3.1 Adapter Tracker

Für die Befestigung des Trackers am TM1100 wurden zwei Varianten verwendet. Bei der ersten handelt es sich um eine direkte Verbindung des Trackers mit der Adapterplatte des TM1100. Dazu wurde der Adapter vom M8-Gewinde auf Kameragewinde (Abbildung 4.4a) verwendet. Der Nachteil dieser Variante ist, dass die Ausrichtung des Trackers am TM1100 nicht verändert werden kann. Die zweite Variante ist eine Kombination aus dem für die Prisentests üblichen Aufsatz eines Steckzapfens am TM1100 und einem Adapter von Steckzapfen auf ein Kameragewinde. Mit diesem Adapter konnte der Tracker auch auf einem Präzisionsträger montiert werden (Abbildung 4.4b). Der Vorteil dieser Variante ist, dass die Ausrichtung des Trackers verändert werden kann. Um den Tracker auch ohne Präzisionsträger in einer Zwangszentrierung befestigen zu können, wurde der DREIFUSSADAPTER LABOR-FOTOADAPTER verwendet, welcher in Abbildung 4.4c zu sehen ist.



(a) Adapter Kameragewinde



(b) Adapter Zwangszentrierung



(c) Adapter Präzisionsträger

Abbildung 4.4: Verschiedene Adapter zur Stabilisierung des VR-Trackers

4.2.3.2 Adapter Controller

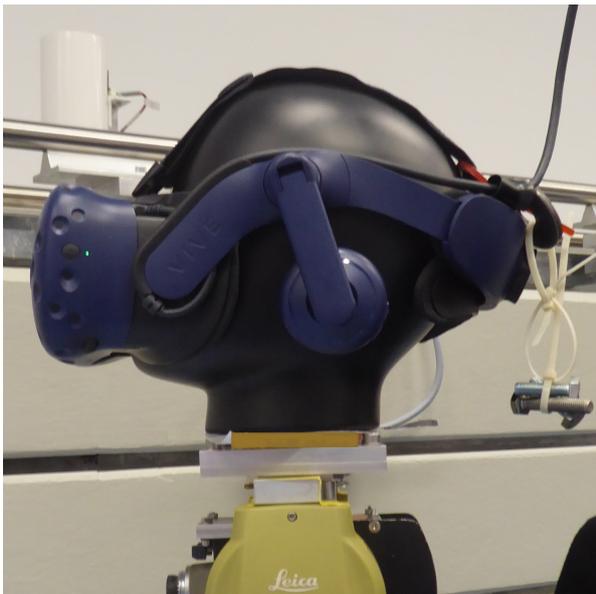
Wie für den Tracker war auch für den Controller ein Adapter notwendig. Um den Controller am TM1100 überprüfen zu können, wurde in Zusammenarbeit mit Magna eine Halterung konstruiert, welche am IGMS mit einem 3D-Drucker gefertigt wurde. Der in Abbildung 4.5 gezeigte Aufbau wird über die vorhandenen Bohrungen der Adapterplatte mit dieser verbunden. Da das Koordinatenzentrum des Controllers nicht bekannt ist, ergibt sich der Nachteil, dass das Koordinatenzentrum des Controllers nicht in der Stehachse des TM1100 liegt. Die Horizontierung ist durch die Bauform des Controllers gegeben. Die wiederholbare Verbindung zwischen Controller und Adapter ist durch die konische Bauform des Griffes möglich.



Abbildung 4.5: Adapter Controller

4.2.3.3 Adapter Brille

Um die Brille auf dem TM1100 befestigen zu können, wurde ein handelsüblicher Brillenhalter in Kopfform von snakebyte adaptiert [snakebyte, 2019]. Die Metallplatte an der Unterseite wurde mit einem Kameragewinde versehen. Zusätzlich wurde der Adapter von M8 auf Kameragewinde, welcher auch für den Tracker verwendet wurde, und eine mit dem 3D-Drucker gefertigte Adapterscheibe benutzt, um eine stabile Aufnahme für das HMD zu erzeugen. Um ein Verkappen des TM1100 zu verhindern, wurden an der Rückseite des Adapters Gegengewichte angebracht. Mit der Kombination dieser Aufnahme und des TM1100 (Abbildung 4.6a) lässt sich die Ausrichtung der Brille kontrolliert verändern. Mit dieser Halterung ist es allerdings nicht möglich, die Brille wiederholbar zu positionieren, da ein eindeutiges Anbringen der Brille am Adapter nicht durchführbar ist. Ein weiterer Nachteil ist, dass das Zentrum des HMD, wie schon beim Controller, nicht in der Drehachse liegt. Das HMD ist zusätzlich auch nicht horizontierbar. Kombiniert man den Adapter für das HMD mit dem DREIFUSSADAPTER LABOR-FOTOADAPTER, ist auch eine Befestigung des HMD in einer Zwangszentrierung und dadurch auf einem Stativ oder Pfeiler möglich. (Abbildung 4.6b).



(a) Adapter TM1100



(b) Adapter Zwangszentrierung

Abbildung 4.6: Verschiedene Adapter zur Stabilisierung des HMD

4.2.3.4 Drehtisch RAK200

Im Zuge der ersten Messungen mit dem VR-System wurde klar, dass das System in Ruhelage des HMD nach einer gewissen Zeit inaktiv wird und keine Daten mehr an die Aufzeichnungssoftware sendet. Um die Brille dauerhaft in Bewegung zu halten, wurde ein Drehtisch des Instituts für Geodäsie eingesetzt. Das Modell RAK200 von Meierling kann mit der mitgelieferten Software über mehrere Stunden automatisiert Bewegungen durchführen [Meierling, 2014]. Während allen Versuchen, bei denen es nicht primär um Messungen zum HMD ging, wurde diese auf dem Drehtisch befestigt und alle drei Minuten abwechselnd um $+90^\circ$ bzw. -90° gedreht, um eine Abschaltung des Systems zu verhindern (Abbildung 4.7).

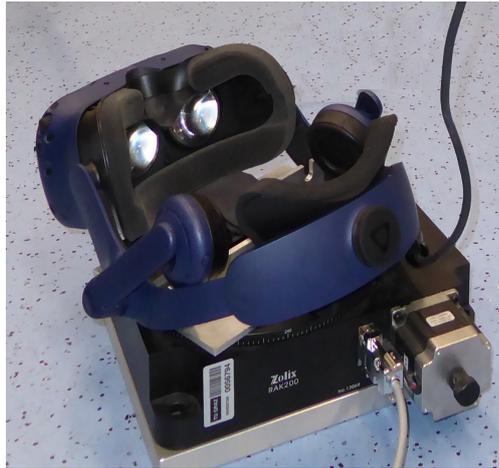


Abbildung 4.7: Drehtisch mit HMD

4.2.4 Ansteuerung des HTC Vive Pro Systems

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben wurde, werden alle Messwerte der Rezeptoren und der IMU von der Software, welche von SteamVR mit dem System mitgeliefert wird, am PC ausgewertet. Ein direkter Zugriff auf die Messdaten (Horizontalwinkel, Vertikalwinkel und Distanz) ist nicht möglich. Um die Anwendungsbereiche für das VR-System nicht auf eigene Produkte einzuschränken, stellt SteamVR Schnittstellen zur Verfügung, über welche die Position und Orientierung der einzelnen Devices ausgelesen werden können.

Das Auslesen der Messdaten des HTC Vive Pro Systems erfolgte im Rahmen der Untersuchungen auf zwei Arten, welche sich in erster Linie durch die eingesetzten Programme/ Programmierumgebungen unterscheiden. Für den Großteil der Tests wurde die Umgebung Unity3d von Unity Technologies verwendet. Für einige Vergleichsmessungen wurde zusätzlich die Umgebung VRED von Autodesk benutzt, da diese beim Projektpartner Magna vorwiegend eingesetzt wird. Beide Programme greifen über das OpenVR-Plugin, welches von SteamVR zur Verfügung gestellt wird, auf die Daten des VR-Systems zu. Dem Anwender ist es möglich, in eigenen Programmierumgebungen virtuelle Objekte zu erstellen und diese mit den Messdaten (Koordinate und Orientierung) der Hardwaredevices zu verknüpfen. Dies erfolgt über die Zuordnung sogenannter Devicestreams. Das Verhalten der Objekte in der VR kann durch eigene Programme angepasst werden. Diese Möglichkeit, den VR-Umgebungen einen eigenen Programmcode hinzuzufügen, wurde genutzt, um die Daten der Objekte auszulesen und abzuspeichern.

4.2.4.1 Verwendete Softwareversionen

Aufgrund der Tatsache, dass die Software von SteamVR ständig mit hoher Geschwindigkeit weiterentwickelt wird, war es nicht möglich, die komplette Testreihe (Messzeit von ca. 1 Jahr) mit derselben Softwareversion durchzuführen. Von Zeit zu Zeit musste ein Update von SteamVR durchgeführt werden, ohne welchem das Programm nicht mehr lauffähig gewesen wäre. Da die Plugins für Unity mit der Software von SteamVR zusammenhängen, mussten auch diese geändert werden. Mit Ausnahme eines speziellen Falles, bei dem es explizit angemerkt wird, wurden alle Versuche mit der Version 1.9.5 von SteamVR, 2018.3.0f2 von Unity und 1.2.3 des SteamVR Plugins in Unity zum Zeitpunkt der Abschlussmessungen (6.8.2019) überprüft. Bei VRED Professional 2019 handelt es sich bei den Versuchen um die Version 11.0.0.9335.

4.2.4.2 Unterschiede zwischen Unity und VRED

Trotz der grundlegend gleichen Zielsetzung der beiden Umgebungen gibt es, bezogen auf die durchgeführten Untersuchungen, drei Unterschiede zwischen den beiden Varianten:

- **Koordinatensystem**
Beim Koordinatensystem von Unity handelt es sich, wie auch in der Koordinatensystemdefinition von HTC für den Tracker (siehe Kapitel 3.2.3), um ein Rechtssystem mit der Höheninformation in der Y-Achse. In VRED hingegen kann ausgewählt werden, ob die Höheninformation in der Y- oder der Z-Achse abgebildet werden soll. In den von Magna zur Verfügung gestellten Routinen für VRED war die Höheninformation in der Z-Achse abgebildet.
- **Verfügbare Devicestreams**
In Unity sowie auch in VRED kann auf die Positions- und Orientierungsdaten der HMD, der Controller und der Tracker zugegriffen werden. Im Unterschied zu Unity ist es in VRED nicht möglich, auf die Daten der Lighthouses zuzugreifen. Dies war mitunter ein Grund, warum der Großteil der Tests mit Unity durchgeführt wurde.
- **Stabilität der Devicestreams**
Ein Nachteil, welcher bei Unity nicht behoben werden konnte, war die Stabilität der Devicestreams. Wie zuvor beschrieben, werden die Datenstreams der Devices mit Objekten in der VR-Umgebung verknüpft und die Daten dieser Objekte in einzelnen Files abgespeichert. Bei Unity kam es aus unterschiedlichen Gründen (z.B. Abschaltung einer VR-Komponente) dazu, dass sich die zugeordneten Devicestreams während der Messung geändert haben und dadurch Messungen verschiedener Devices vermischt wurden. Diese Problematik wurde auch von Luckett (2018) erkannt und beschrieben. Bei VRED hat sich diese Problematik nicht gezeigt.

4.2.4.3 Messroutinen in Unity

Um für die verschiedenen Versuche möglichst automatisierte Abläufe zu schaffen, wurden folgende Möglichkeiten der Ansteuerung/Aufzeichnung in Unity implementiert. Alle Varianten zeichnen die Koordinaten und Orientierungen aller drei Achsen für HMD, Controller, Tracker und Lighthouses auf und versehen sie mit einem Zeitstempel.

- **Dauermessung - PC**
Start und Stopp der Aufzeichnung erfolgt durch Mausklick am PC. Die Aufzeichnung der

Daten findet mit einer Messrate von ca. 100 Hz statt. Die Daten werden in Files getrennt nach Devices abgespeichert.

- Dauermessung – TCP/IP
Messung mit der gleichen Messrate und Datenspeicherung wie bei Dauermessung - PC. Die Steuerung erfolgt aber über das TCP/IP-Protokoll. Dadurch ist eine Steuerung der Messroutine in Unity durch ein Matlab-Programm möglich.
- Epochenmessung – Controller
Messung von 500 Messungen mit einer Datenrate von ca. 100 Hz. Das Auslösen der Messung erfolgt durch Betätigung des Tasters am Controller. Jede Epoche wird in eigenen Datenfiles abgelegt.
- Einzelmessung – TCP/IP
Messung einer bestimmten Anzahl von Einzelmessungen. Die Anzahl kann per TCP/IP übergeben werden.

4.2.4.4 Datenaufzeichnung mit Autodesk VRED

Da das Auslesen der Daten mithilfe der Umgebung von Autodesk VRED nur für einige Vergleichsmessungen verwendet wurde, wurde hier nur die Möglichkeit der Dauermessung durch Usereingabe am PC implementiert. Die Datenrate der Aufzeichnung beträgt in VRED ca. 300 Hz.

4.3 Untersuchung des Verhaltens der Koordinatenmessung der Devices

In diesem Abschnitt soll die Positionsbestimmung des VR-Systems überprüft werden. Dazu wurden das Positionsverhalten des HMD, der Controller und mehrerer Tracker mit unterschiedlichen Versuchsaufbauten untersucht. Neben einem Vergleich des statischen Messrauschens wurden auch systematische Effekte untersucht.

4.3.1 Untersuchung des Messrauschens

Die erste durchgeführte Untersuchung befasste sich mit dem Messrauschen bzw. der Stabilität der statischen Messwerte.

4.3.1.1 Messaufbau Messrauschen Pfeiler 1

Um das Messrauschen des HMD zu untersuchen, wurde dieses auf einem Pfeiler im Messlabor aufgelegt. Wie in Abbildung 4.8 ersichtlich ist, wurden die Lighthouses in einem Abstand von ca. 2 m zur Brille und orthogonal zueinander aufgestellt. Die Ausrichtung der Brille erfolgte zwischen den beiden Lighthouses. Dadurch sollte von beiden Lighthouses eine ähnliche Anzahl an Dioden sichtbar sein. Neben dem Pfeiler mit der Brille wurde zusätzlich ein Kamerastativ mit einem Tracker bestückt und in ähnlicher Entfernung aufgestellt. Für die Datenaufzeichnung wurde die zuvor beschriebene Funktion Dauermessung – PC verwendet.

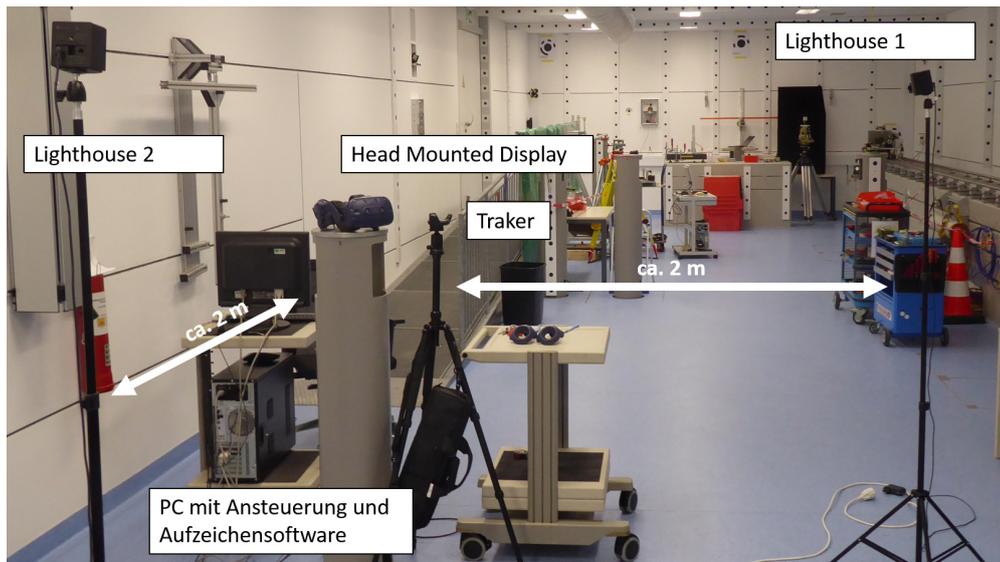


Abbildung 4.8: Versuchsaufbau Messrauschen HMD und Tracker

Diese aufgezeichneten Daten von HMD und Tracker sind in der Abbildung 4.9 dargestellt. Zur Vergleichbarkeit der Datensätze wurde von allen Zeitreihen der Mittelwert abgezogen. Die Daten der HMD weisen in der Y-Komponente (Höhenkomponente) offensichtlich geringere Differenzen zum Mittelwert auf. Dies ist auch in der Tabelle 4.2 anhand der Standardabweichungen zu sehen. Betrachtet man die beschriebenen Abweichungen zum Mittelwert in der Lage (X-Z-Ebene), lässt sich in Abbildung 4.10 ein beinahe isotropes Rauschverhalten erkennen.

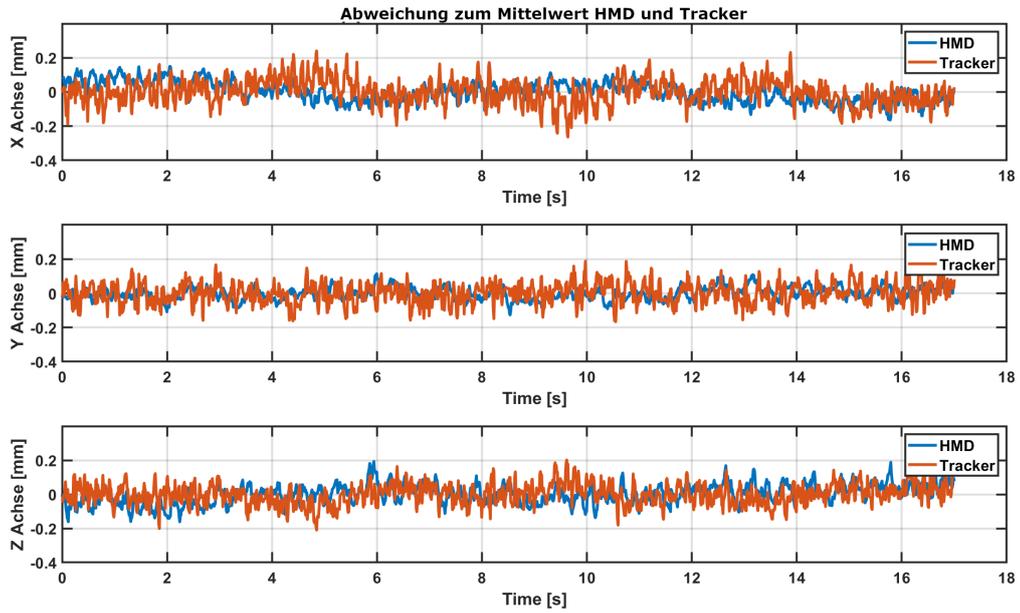


Abbildung 4.9: Messrauschen HMD und Tracker - Abweichung zum Mittelwert

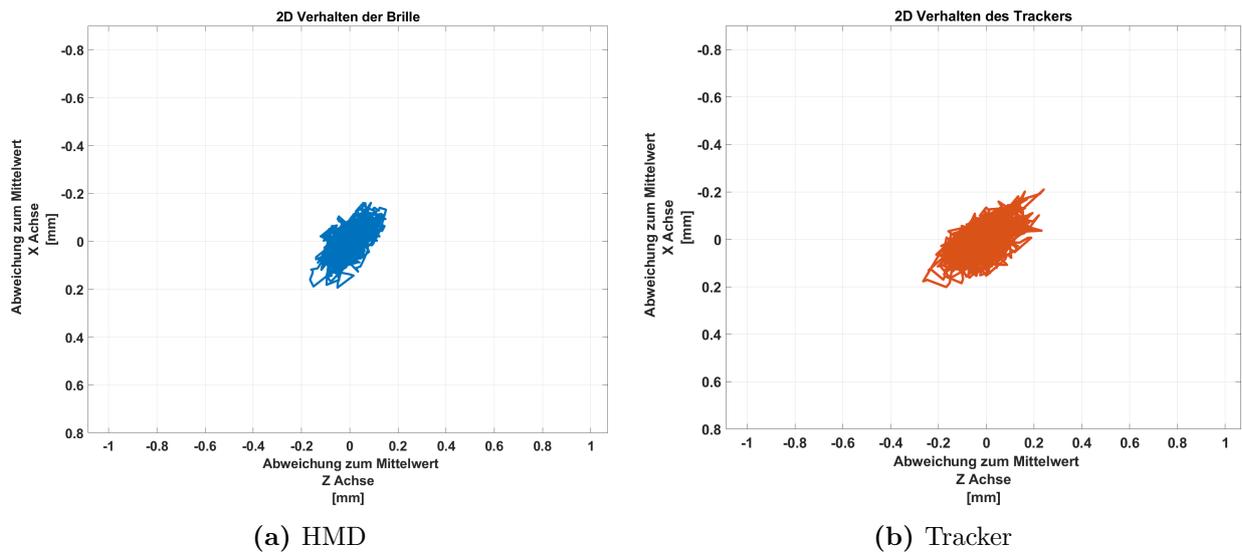


Abbildung 4.10: Abweichung des Messrauschens in der Lage (X-Z-Ebene)

Tabelle 4.2: Standardabweichung des Messrauschens von HMD und Tracker

	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
STD HMD	0,06 mm	0,04 mm	0,06 mm
STD Tracker	0,07 mm	0,06,mm	0,06 mm

4.3.1.2 Messaufbau Messrauschen Pfeiler 2

Um den Einfluss der Sichtverbindung zu den Lighthouses auf das Messrauschen zu bestimmen, wurde der Versuchsaufbau *Messrauschen Pfeiler 1* wiederholt (Abbildung 4.8). Im Unterschied zum ersten Versuch wurde ein Lighthouse (LH 2) deaktiviert und der Versuch neu gestartet. Im laufenden Betrieb wurde anschließend das Lighthouse wieder aktiviert. Nach einiger Messzeit wurde abschließend das Lighthouse 1 deaktiviert. In Abbildung 4.11 sind die Abweichungen zum Mittelwert der drei Achsen dargestellt. Im Rauschverhalten sind die drei Phasen deutlich erkennbar. Die Abweichungen zum Mittelwert steigen in der Lage deutlich an, wenn nur ein Lighthouse aktiv ist. Der Unterschied in der Höhenkomponente (Y-Achse) ist nicht so stark ausgeprägt.

In Abbildung 4.12a ist die Punktverteilung in der X-Z-Ebene dargestellt. Auch hier sind die drei Phasen deutlich erkennbar. In Abbildung 4.12b ist der Messaufbau des Versuchs aus derselben Perspektive visualisiert. Vergleicht man die Ausrichtung des Messrauschens mit der Lage der Komponenten zueinander, ist deutlich erkennbar, dass das Rauschen jeweils auf das aktive Lighthouse ausgerichtet ist. In der Phase, in welcher beide Lighthouses sichtbar sind, zeigt sich das selbe, nahezu isotrope Verhalten, wie in den Ergebnissen des ersten Versuchs.

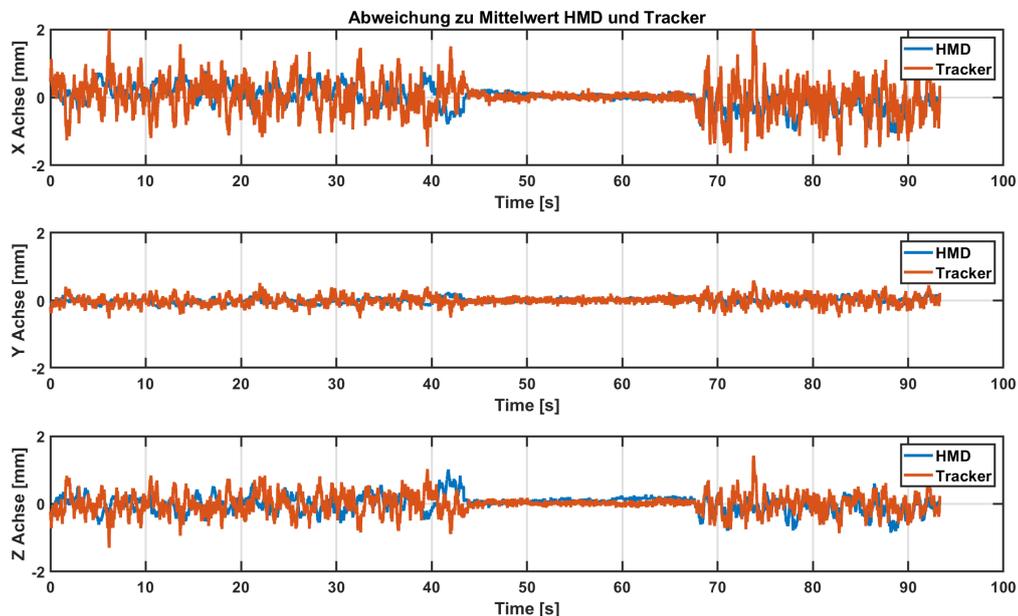
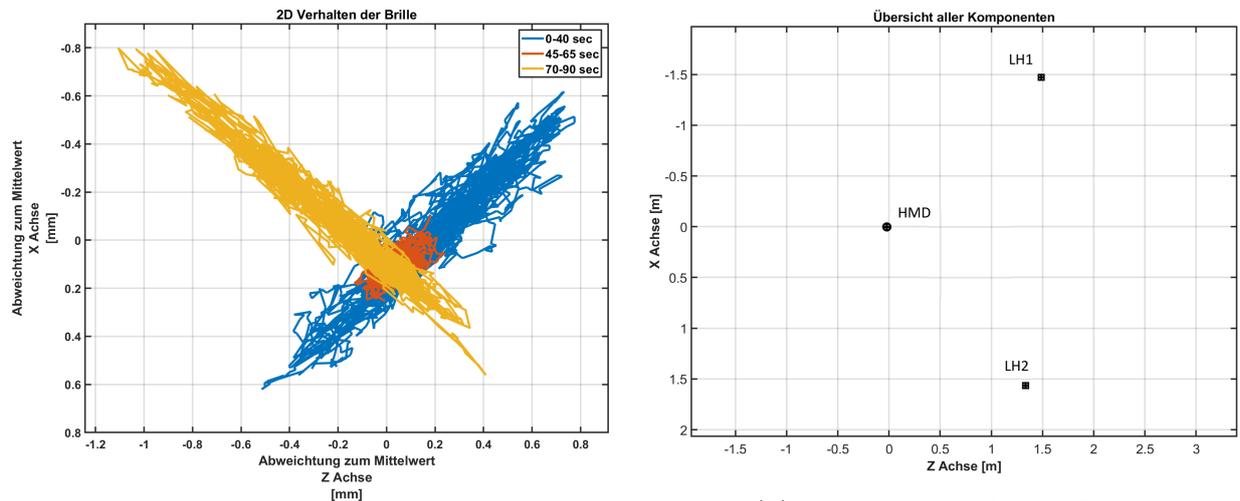


Abbildung 4.11: Messrauschen HMD und Tracker - Abweichung zum Mittelwert bei Signalunterbrechung



(a) Abweichung des Messrauschens der HMD bei Signalunterbrechung

(b) Anordnung des Messaufbaus

Abbildung 4.12: Abweichung des Messrauschens in der Lage in Referenz zur Messanordnung

4.3.1.3 Messaufbau Messrauschen Raster

Um zu untersuchen, wie sich die Lage der Brille im Verhältnis zu den Lighthouses auf das Messrauschen auswirkt, wurden Messungen in verschiedenen Konfigurationen durchgeführt. Dazu wurde, wie in Abbildung 4.13 ersichtlich ist, am Boden des Messlabors ein Raster mit einer Fläche von 3×3 m und einem Abstand zwischen den Rasterpunkte von $0,75$ m markiert. Da es in diesem Versuch nicht um eine exakt wiederholbare Positionsmessung ging, wurde auf eine aufwändige Vermarkung und die Verwendung des Brillenadapters verzichtet. Die Brille wurde direkt auf dem Boden aufgelegt. Die Lighthouses wurden in einem Abstand von $0,5$ m vom Raster jeweils mittig an zwei Seiten aufgebaut. Um die Ausrichtung der Brille zu definieren, wurde das Raster in zwei Bereiche aufgeteilt. In der Abbildung 4.13 sind diese eingezeichnet. Im grünen Bereich wurde die Brille parallel zur Verbindungslinie zwischen den Lighthouses mit Blick Richtung Verbindungslinie ausgerichtet. Im blauen Bereich wurde die Ausrichtung um 180° zu vorher geändert. An den drei Positionen entlang der Übergangslinie wurde in beiden Lagen gemessen. Dieses Vorgehen war aufgrund der Bauform der Brille notwendig, um zu gewährleisten, dass immer genügend Rezeptoren von beiden Lighthouses aus sichtbar waren.

Die Messungen wurden mit der in Kapitel 4.2.4.3 vorgestellten Messroutine Epochenmessung - Controller durchgeführt. Die Auswertung der Messdaten erfolgte nur in der X-Z-Ebene. Da, wie sich in den Versuchen *Messrauschen Pfeiler 1* und *Messrauschen Pfeiler 2* (Abschnitt 4.3.1.1 und 4.3.1.2) gezeigt hat, das Messrauschen eine isotrope oder elliptische Form aufweist, wurde für jeden Datensatz eine Hauptachsentransformation durchgeführt und die Standardabweichung der Hauptachsen bestimmt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abbildung 4.14 zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass das aus dem ersten Versuch bekannte nahezu isotrope Rauschmuster nicht an allen Messpositionen aufgetreten ist. An einigen Messpositionen ist eine deutliche Ausrichtung der Rauschellipse auf das Lighthouse 1 sichtbar. Es ist keine direkte Abhängigkeit zwischen der Entfernung zu den Lighthouses und der Form des Messrauschens zu erkennen.

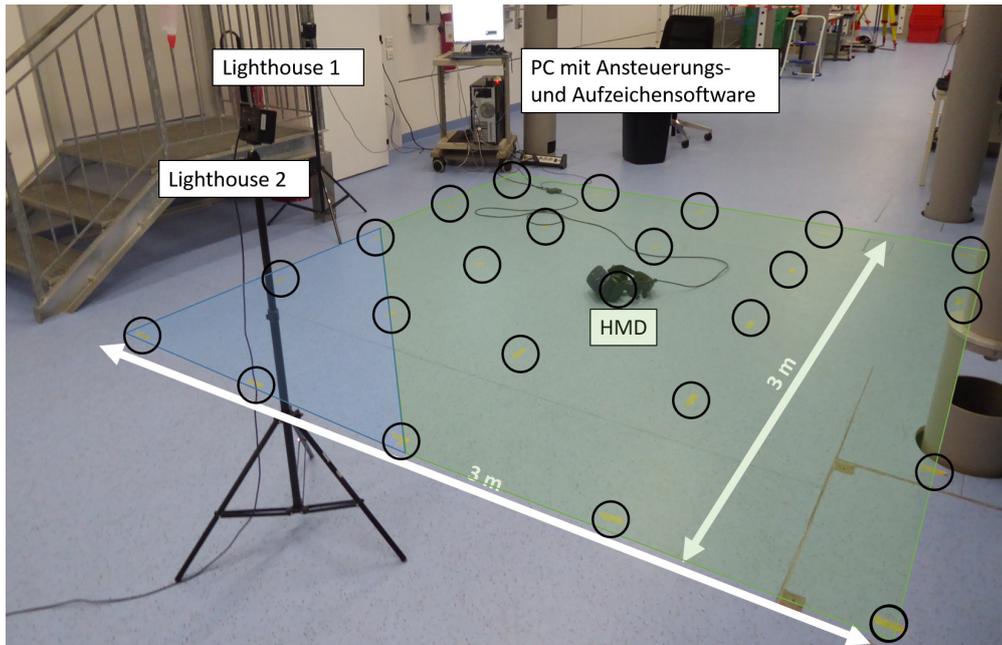


Abbildung 4.13: Versuchsaufbau Messrauschen im Raster

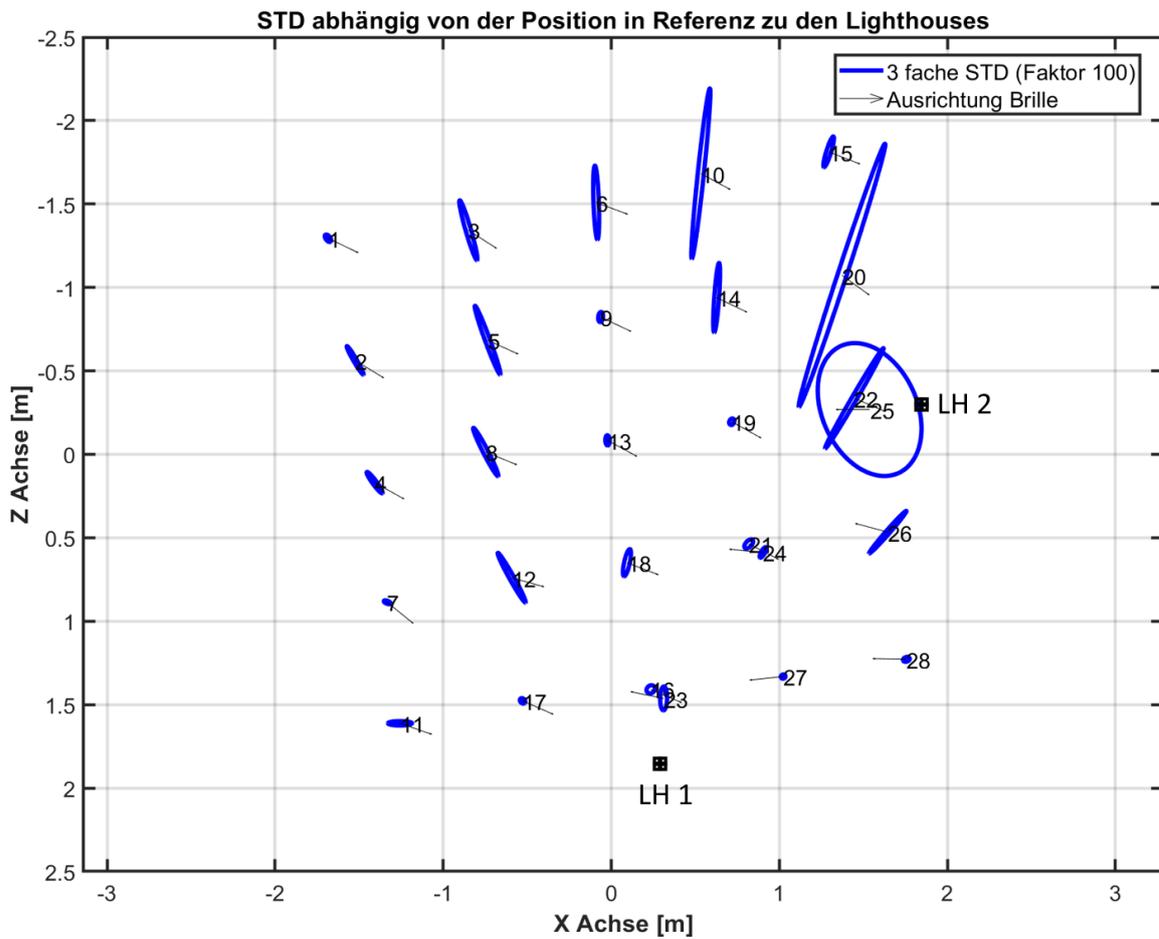


Abbildung 4.14: Ausrichtung Messrauschen im Raster bei zwei Lighthouses

4.3.1.4 Messaufbau Messrauschen Komponentenvergleich

Aufgrund der unterschiedlichen Positionen von Tracker und Brille im Versuchsaufbau Messrauschen 1 (Abschnitt 4.3.1.1) ist kein direkter Vergleich zwischen den Devices möglich. Aus diesem Grund wurde ein weiterer Messaufbau definiert. Das Ziel dieses Versuchs war die Bestimmung der Größenordnungen des Messrauschens unterschiedlicher Devicetypen, wenn nur ein Lighthouse sichtbar ist. Wie in Abbildung 4.15 zu sehen ist, wurden drei Zwangszentrierungen auf Stativen bzw. einem Messpfeiler im Abstand von 2 m zu einem Lighthouse aufgebaut. Die VR-Komponenten (HMD, Controller und TR) wurden, mithilfe der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Adapter, nacheinander in den Zwangszentrierungen befestigt. Durch dieses Vorgehen war eine wiederholbare Positionierung gegeben. Der Offset der Koordinatenzentren zueinander ist mit maximal 20 cm anzugeben. Die Gründe dafür sind in der Beschreibung der Adapter angeführt. Die Daten wurden mittels der Messroutine Dauermessung - PC aufgezeichnet.

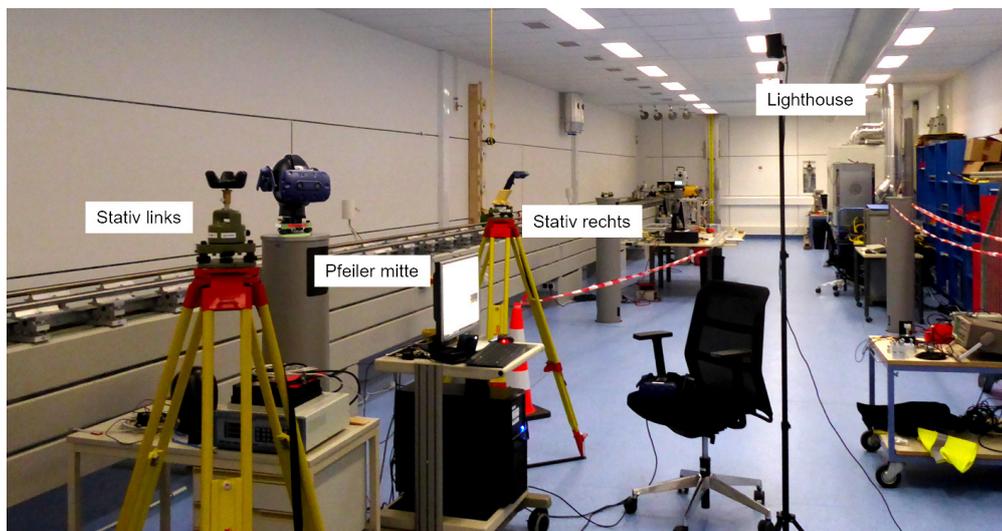
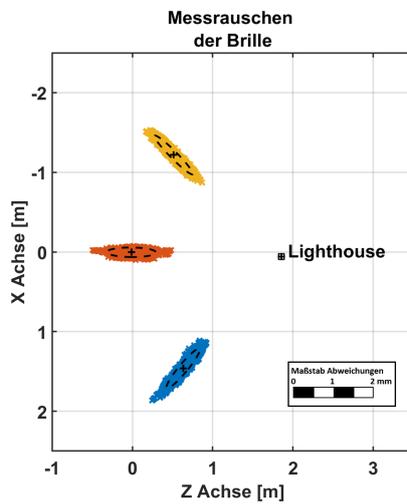


Abbildung 4.15: Vergleich des statischen Messrauschens von HMD, Controller und TR

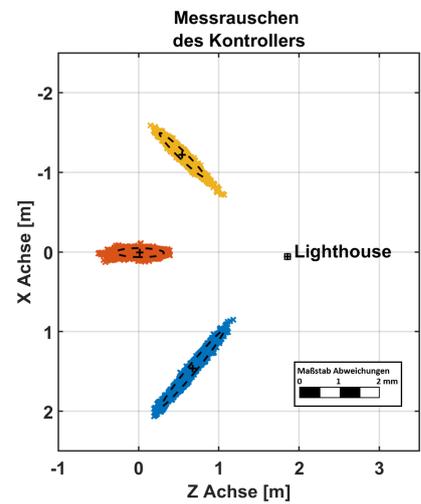
Wie in Abbildung 4.16 zu erkennen ist, weist das Messrauschen aller Komponenten eine elliptische Form auf, welche deutlich auf das Lighthouse ausgerichtet ist. Die Größenordnung der Abweichungen ist zwischen den Komponenten unterschiedlich. Zur Berechnung der Werte, welche in der Tabelle 4.3 ersichtlich sind, wurde für alle Messpositionen und Devices eine Transformation der Messwerte in Abhängigkeit der Richtung von Device zum Lighthouse durchgeführt. Daraus ergibt sich die Unterteilung der Werte in Längs- und Querrichtung zum Lighthouse. Diese entsprechen aufgrund der Systematik des Rauschens auch den Werten der Haupt- und Nebenachsen der Rauschellipsen. In der Tabelle ist zu erkennen, dass die Brille das geringste Rauschen aufweist. Im Vergleich dazu steigt das Rauschen des Controllers vor allem in den beiden seitlichen Positionen an. Der Tracker weist auf allen Positionen ein deutlich höheres Messrauschen auf.

Tabelle 4.3: Spannweite und Standardabweichung des Messrauschens von HMD, Controller und Tracker bei Verwendung von einem Lighthouse

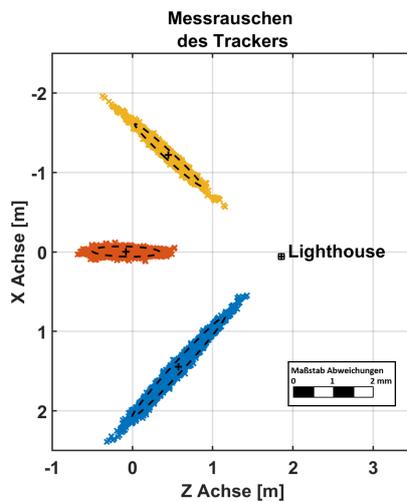
		Spannweite / STD des Messrauschens		
		Stativ links (-52°)	Pfeiler Mitte (0°)	Stativ rechts (42°)
Quer	HMD	0.4 mm / 0.05 mm	0.4 mm / 0.05 mm	0.3 mm / 0.04 mm
	Controller	0.3 mm / 0.04 mm	0.5 mm / 0.04 mm	0.3 mm / 0.03 mm
	Tracker	0.5 mm / 0.05 mm	0.5 mm / 0.05 mm	0.3 mm / 0.04 mm
Längs	HMD	2.0 mm / 0.26 mm	2.0 mm / 0.25 mm	1.9 mm / 0.28 mm
	Controller	3.1 mm / 0.50 mm	1.8 mm / 0.25 mm	2.5 mm / 0.32 mm
	Tracker	5.0 mm / 0.70 mm	2.4 mm / 0.35 mm	4.1 mm / 0.46 mm



(a) HMD



(b) Controller



(c) Tracker

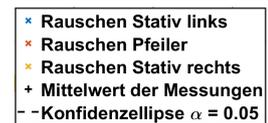


Abbildung 4.16: Vergleich des Messrauschens der VR-Komponenten bei Sichtverbindung zu einem Lighthouse

4.3.2 Untersuchung des Messbereichs der Devices

Die Untersuchungen des Messbereichs der Lighthouses wurden in zwei Versuche unterteilt. Der erste Versuch befasst sich mit dem Öffnungswinkel des Lighthouses und dem sich daraus ergebenden Sichtfeld. Beim zweiten Versuch wurde die maximale Distanz zwischen Device und Lighthouse bestimmt. Beide Untersuchungen wurden auf dem in Abschnitt 4.2.2.1 beschriebenen Horizontalkomparator durchgeführt. Als VR-Komponente wurde der Tracker verwendet. Die Ergebnisse dieser Messungen können aber für alle anderen Komponenten übernommen werden. Die Aufzeichnung der Messungen erfolgte mit der Aufzeichnungsroutine Dauermessung-PC. Die Messdaten wurden anschließend in Matlab automatisiert in dynamische und statische Phasen unterteilt und analysiert. Bei beiden Versuchen wurde die Messung zum Tracker mit einem Lighthouse durchgeführt. Das zweite Lighthouse wurde außerhalb des Sichtbereichs des Trackers aufgestellt und auf das HMD ausgerichtet. Die Brille wurde auf dem in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Drehtisch befestigt und alle drei Minuten bewegt. Dieses Vorgehen war notwendig, da das VR-System in den Stand-by-Modus wechselt, wenn die Brille für 5 Minuten nicht bewegt wird und die Versuche auf der Komparatorbank mehr Zeit in Anspruch nahmen.

4.3.2.1 Messaufbau Komparator Öffnungswinkel

In Abbildung 4.17 ist ein Aufbau der Versuchsreihe zur Bestimmung des Öffnungswinkels dargestellt. Das Lighthouse wurde auf Höhe der Startposition des Verschiebewagens mit einem Orthogonalabstand von 4 m (Versuch 1) bzw. 1 m (Versuch 2) zur Komparatorbank positioniert. Die Höhe des Lighthouses wurde so eingestellt, dass der Tracker und das Lighthouse in der selben Ebene lagen. Die Ausrichtung erfolgte direkt auf die Startposition des Trackers. Anschließend wurde der Verschiebewagen mit dem darauf befestigten Tracker nach links und rechts verfahren. Alle 0,25 m wurde angehalten, um eine statische Messung mit dem Tracker durchzuführen.

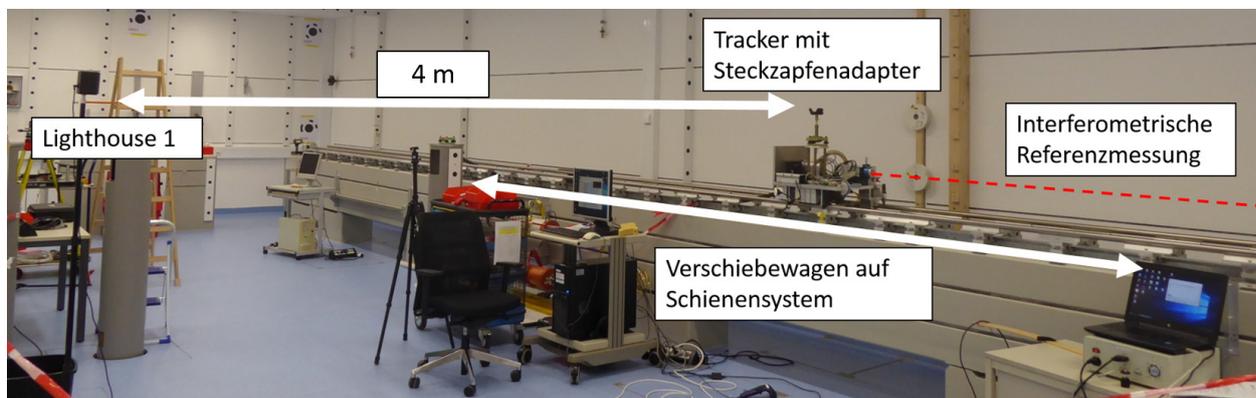
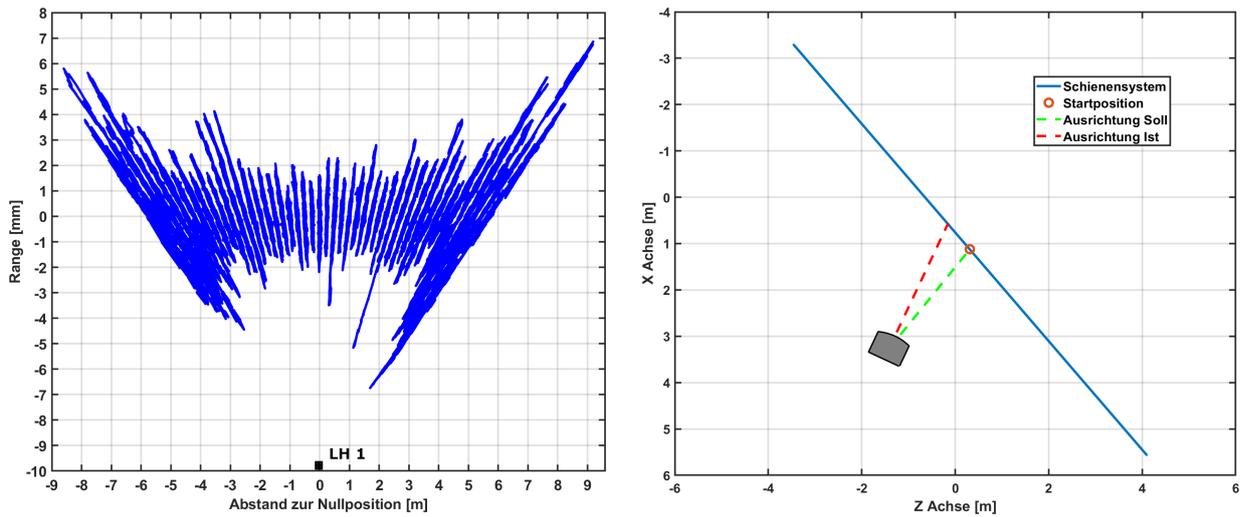


Abbildung 4.17: Messaufbau - Bestimmung des Öffnungswinkels

In der Abbildung 4.18a sind die Messergebnisse des ersten Versuchs mit einem Abstand von 4 m zur Komparatorbank dargestellt. Die Abbildung zeigt das Messrauschen in der Lage (X-Z-Ebene). Es ist die schon in Abschnitt 4.3.1 beschriebene Ausrichtung des Rauschens auf das Lighthouse deutlich sichtbar. Die nach außen hin größer werdenden Abweichungen lassen auf eine Abhängigkeit bezüglich der Ausrichtung des Lighthouses und eine distanzabhängige Zunahme des Rauschens schließen. Da in den Ergebnissen zu erkennen ist, dass die Abweichungen nicht symmetrisch sind, wurden die Daten des Lighthouses ausgelesen und in Abbildung 4.18b in Referenz zu den Messpositionen dargestellt. Dadurch wurde deutlich, dass die Ausrichtung des Lighthouses auf die Startposition nicht exakt durchgeführt wurde. Dies könnte die nicht symmetrischen Effekte des Messrau-



(a) Messrauschen bei seitlichem Verfahren, Orthogonalabstand zur Komparatorbank 4 m (b) Ausrichtung des Lighthouses SOLL-IST-Vergleich

Abbildung 4.18: Messrauschen in Lage bei seitlichem Verfahren, Abstand zum LH 4 m, in Referenz zur Messanordnung

schens erklären und würde gleichzeitig den Einfluss der Ausrichtung des Lighthouses bestätigen. Um den Messbereich des Lighthouses zu analysieren, wurden die Differenzen aller mit dem VR-Tracker gemessenen Positionen zur Startposition gebildet. Daraus wurden die Abweichungen zur Referenzmessung gebildet, welche in Abbildung 4.19 dargestellt sind. Um die Ursache für die Verschlechterung der Messungen zu überprüfen, wurden drei unterschiedliche Bezugsachsen gewählt. Betrachtet man den Abbruch der Messungen in Referenz zum Winkel, wird in diesem Fall der vom Hersteller angegebene Sichtbereich von $\pm 60^\circ$ nicht verlassen und trotzdem sind keine Messungen mehr möglich. In Bezug auf den Abstand zwischen Tracker und Lighthouse ist zu erkennen, dass der Abbruch bei ca. 7 m liegt. Da dies nahe an der vom Hersteller angegebenen Größe des Messbereichs ist, ist der Abbruch der Messung aufgrund einer zu großen Distanz zum Lighthouse die wahrscheinlichere Ursache.

Um den Einfluss des Abstands zwischen Lighthouse und Tracker zu eliminieren und eine eindeutige Überprüfung des Öffnungswinkels durchzuführen, wurde der Versuch mit einem Abstand von einem Meter zur Startposition des Trackers wiederholt. Betrachtet man die Darstellung der Messergebnisse in Abbildung 4.20, ist deutlich zu erkennen, dass auch Messungen über den vom Hersteller angebenen Bereich von $\pm 60^\circ$ möglich sind. Das System liefert bis ca. $\pm 75^\circ$ brauchbare Daten. Danach nehmen die Abweichungen stark zu. Ein kompletter Ausfall der Messungen konnte nicht herbeigeführt werden. Dies ist in der Abbildung 4.22 zu erkennen, in welcher die zugehörigen Standardabweichungen der statischen Phasen dargestellt sind. In dem Fall, dass keine Messungen zum Device möglich sind, liefert Unity weiterhin Datensätze. Bei den gelieferten Daten handelt es sich allerdings immer um die letzte mögliche Messung. Sind also an einer statischen Messposition keine Messungen möglich, fällt die Standardabweichung für diese Messposition auf null. Da dies, wie in der Abbildung 4.22 zu sehen ist, nicht passiert ist, fand keine Unterbrechung statt. Betrachtet man die Abbildung 4.21, in welcher die Abweichungen zur Referenz vergrößert dargestellt sind, erkennt man, dass diese Abweichungen bei Hin- und Rückmessung nahezu identisch sind. Diese Erkenntnis lässt auf einen systematischen Einfluss schließen.

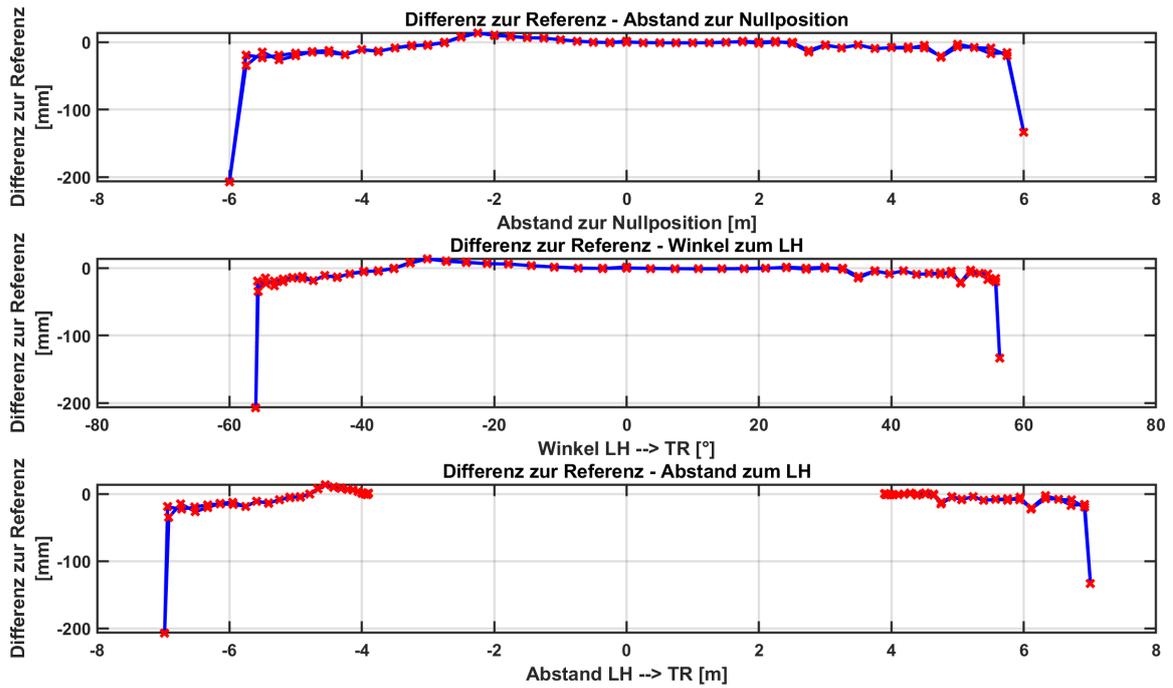


Abbildung 4.19: Abweichungen zur Referenz im Vergleich zur Abstand zur Nullposition, Abstand zum Lighthouse und Winkel zum Lighthouse (Abstand LH zur Komparatorbank 4 m)

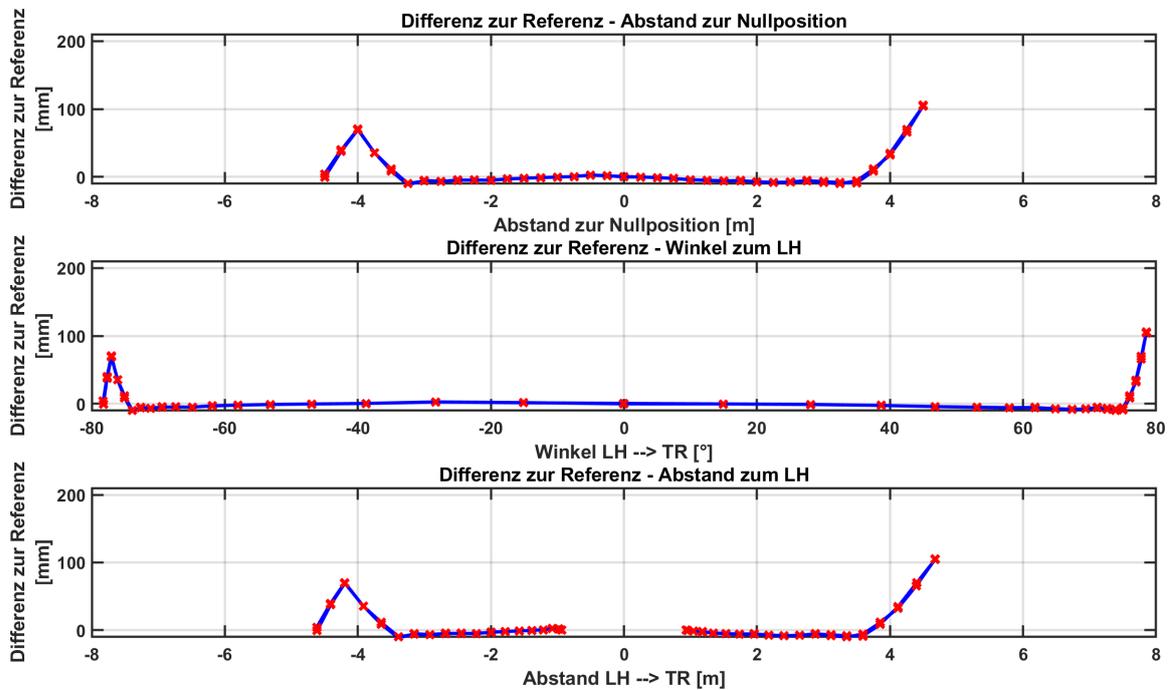


Abbildung 4.20: Abweichungen zur Referenz in Bezug zum Abstand zur Nullposition, Abstand zum Lighthouse und Winkel zum Lighthouse (Abstand LH zur Komparatorbank 1 m)

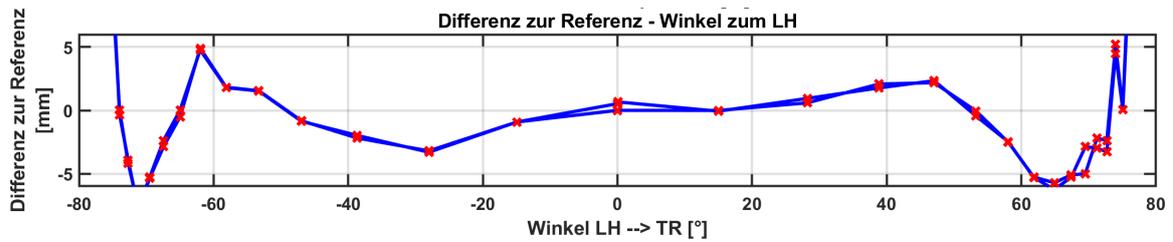


Abbildung 4.21: Abweichung zur Referenz i Bezug zum Winkel zum Lighthouse (vergrößert)

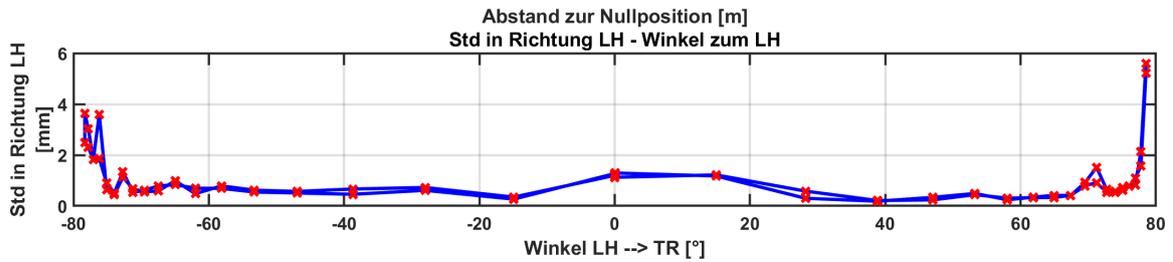


Abbildung 4.22: Standardabweichung der statischen Messungen in Bezug zum Winkel zum Lighthouse

4.3.2.2 Messaufbau Komparator Distanz 1

Um herauszufinden, wie groß die maximal messbare Distanz zum Lighthouse ist, wurde ein weiterer Versuchsaufbau auf der Komparatorbank durchgeführt. Wie in Abbildung 4.23 dargestellt ist, wurde ein Lighthouse an der Stirnseite der Komparatorbank aufgestellt. Das Stativ des Lighthouses wurde auf die selbe Höhe wie der Tracker eingestellt und das Lighthouse direkt auf diesen ausgerichtet. Anschließend wurde der Tracker in 0,2m Schritten vom Lighthouse auf maximal 12m entfernt und wieder herangeführt. Die Startdistanz zwischen Lighthouse und Tracker wurde aus den Messdaten des VR-Systems bestimmt und mit einem Maßband kontrolliert.

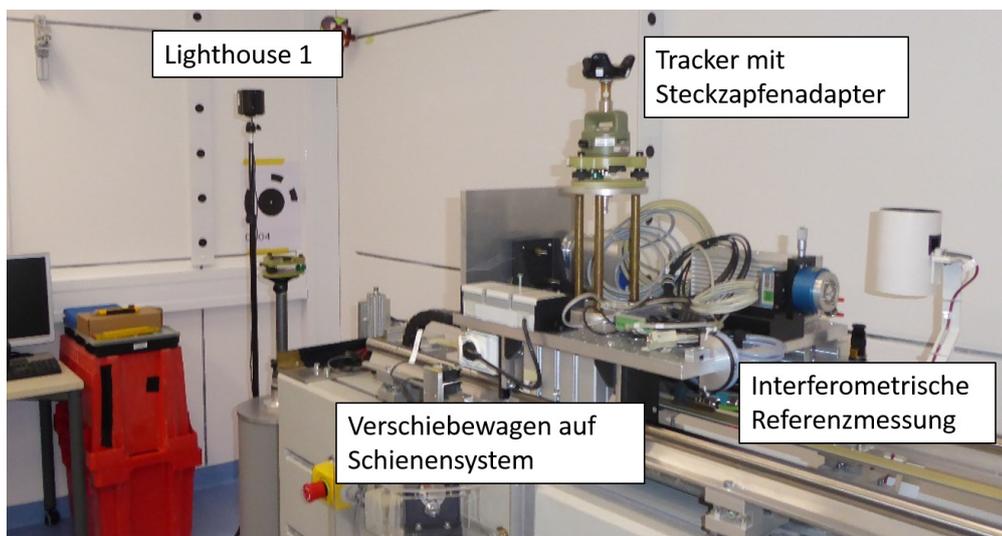


Abbildung 4.23: Messaufbau Bestimmung des maximalen Abstands zwischen Lighthouse und Device

Wie in Abbildung 4.24 ersichtlich ist, steigen die Abweichungen bis zu einem Abstand von 7 m relativ gleichmäßig an. Dies weist auf ein Maßstabsproblem hin (genauere Untersuchungen zum Thema Maßstab folgen in Abschnitt 4.3.4). Ab einem Abstand von 7 m vergrößern sich die Abweichungen zur Referenz sowie auch die Standardabweichung der X-Achse, welche in Abbildung 4.25 abge-

bildet ist, deutlich. Da die X-Achse annähernd parallel zur Komparatorbank liegt, repräsentieren die Standardabweichungen in Richtung der X-Achse in diesem Versuch die Standardabweichung in Richtung des Lighthouses. Sobald der Tracker außerhalb des Messbereichs des Lighthouses ist, liefert das VR-System bis zum Wiedereintritt in den Messbereich durchgehend den letzten messbaren Wert. Dadurch sinkt auch die Standardabweichung auf null (Abbildung 4.26). Dieser Versuch hat somit gezeigt, dass ab einer Entfernung von 7 m zwischen Lighthouse und Device grobe Abweichungen zum wahren Wert vorhanden sind. Ab einem Abstand von 7,4 m sind keine Messungen mehr möglich.

Der minimale Messabstand konnte in diesem Versuchsaufbau nicht bestimmt werden.

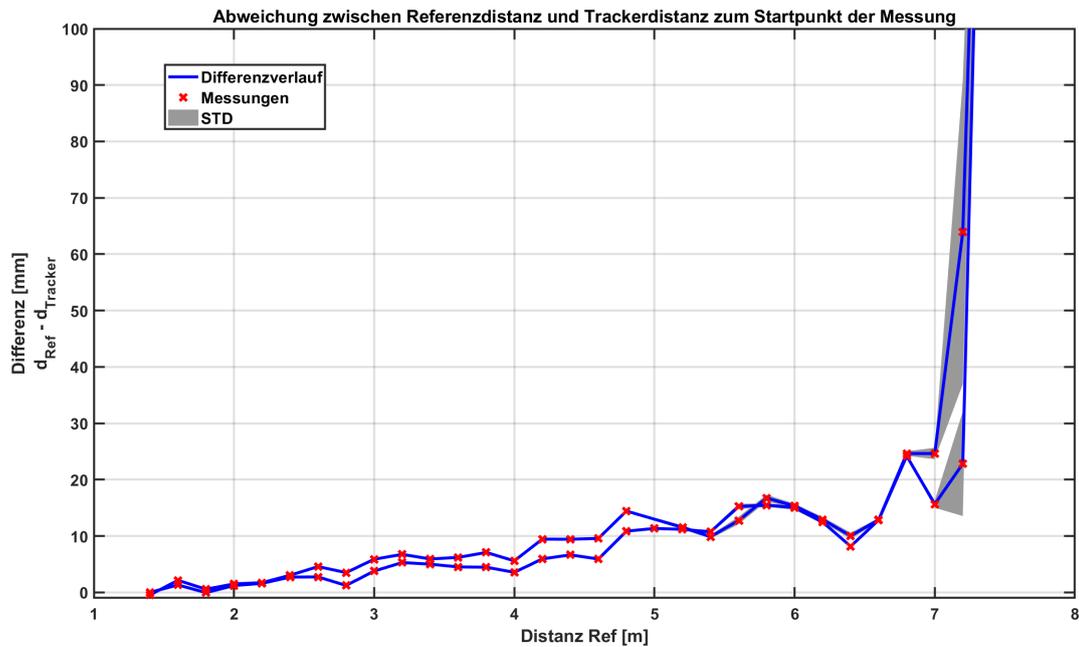


Abbildung 4.24: Abweichung zwischen Referenzdistanz und Trackerdistanz bezogen auf den Startpunkt der Messung

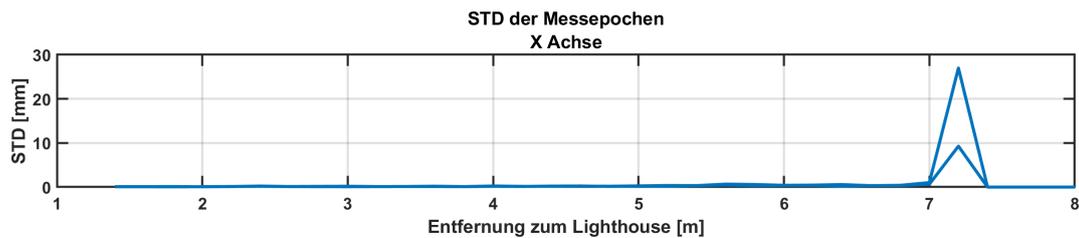


Abbildung 4.25: Standardabweichung der statischen Messungen in Bezug auf den Abstand zum Lighthouse

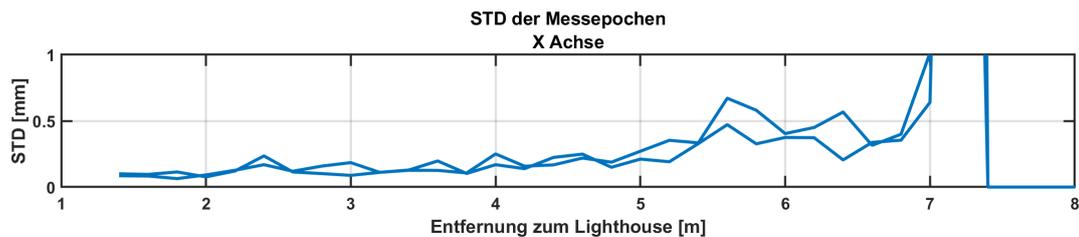


Abbildung 4.26: Standardabweichung der statischen Messungen in Bezug auf den Abstand zum Lighthouse (vergrößert)

4.3.2.3 Messaufbau Komparator Distanz 2

Um auch die Grenzen von Messungen im Nahbereich des Lighthouses zu überprüfen, wurde für das Lighthouse ein eigener Befestigungsrahmen auf der Komparatorbank aufgebaut (Abbildung 4.27). Dadurch konnte der Mindestabstand zwischen Lighthouse und Tracker auf 0,45 m verringert werden. Die Schrittweite der Messpositionen wurde mit 0,2 m beibehalten. Als Maximalabstand zwischen Tracker und Lighthouse wurden 6,05 m definiert. Dadurch war gewährleistet, dass der Messbereich des Systems nicht verlassen wurde. Zur Verifikation der Ergebnisse wurde jede Messung mit drei Messzyklen durchgeführt. Um diese Messungen auch für die Maßstabsuntersuchungen in Abschnitt 4.3.4 verwenden zu können, wurden die Messungen mit allen drei zur Verfügung stehenden Trackern wiederholt. Da es bei den Vorversuchen zu unerklärlichen Koordinatensprüngen gekommen ist, wurde ein zusätzlicher Tracker auf einem Pfeiler installiert. Mit diesem sollte kontrolliert werden, ob es sich bei den Koordinatensprüngen um Sprünge des gesamten Systems oder der Devicekoordinate handelt. Um das System aktiv zu halten, war das zweite Lighthouse in Bodennähe installiert und auf die Brille ausgerichtet worden. Diese befand sich am Drehtisch und wurde alle drei Minuten bewegt.

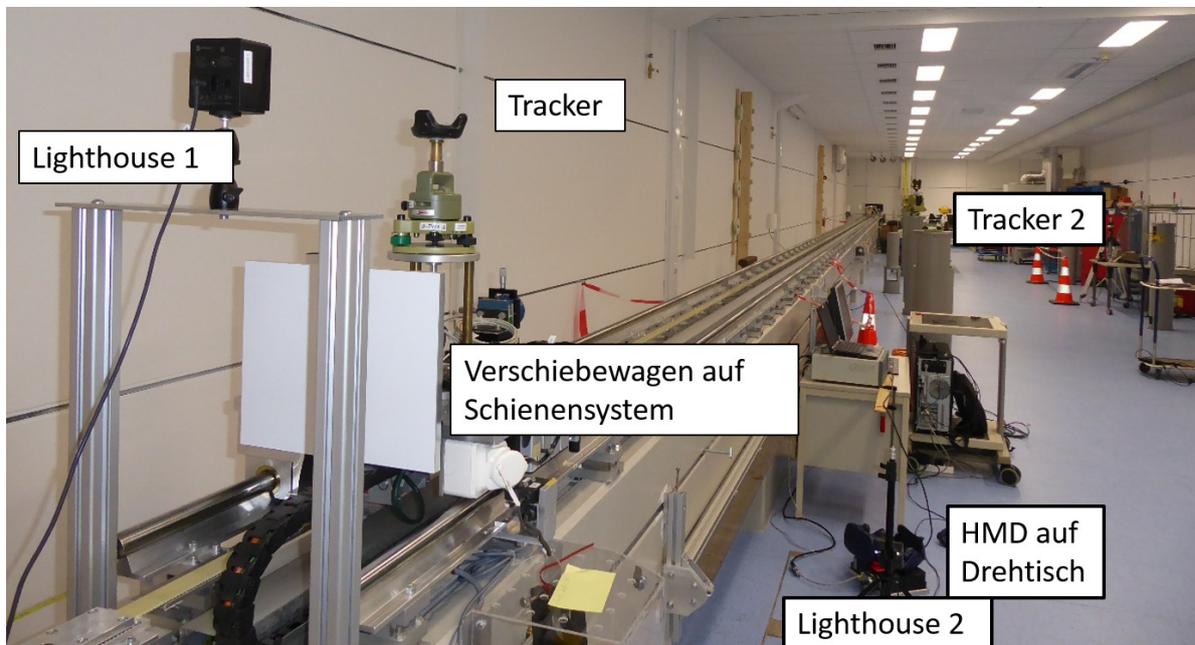
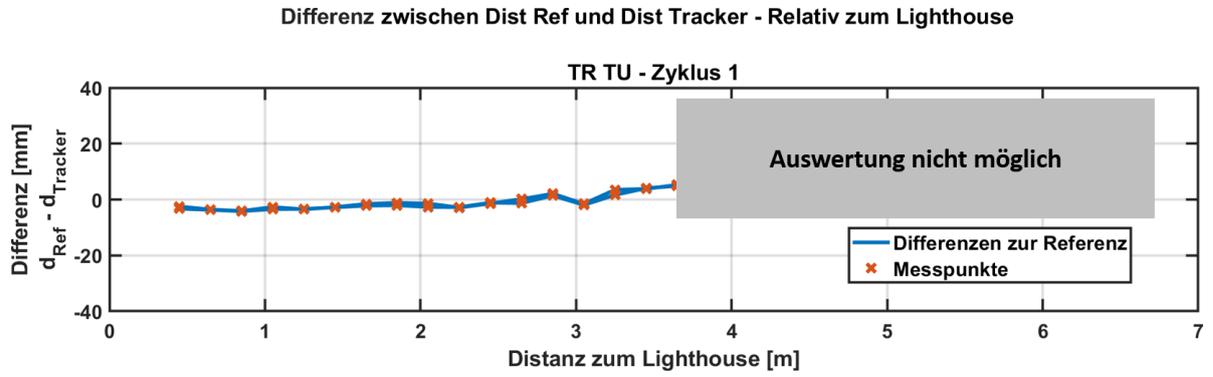
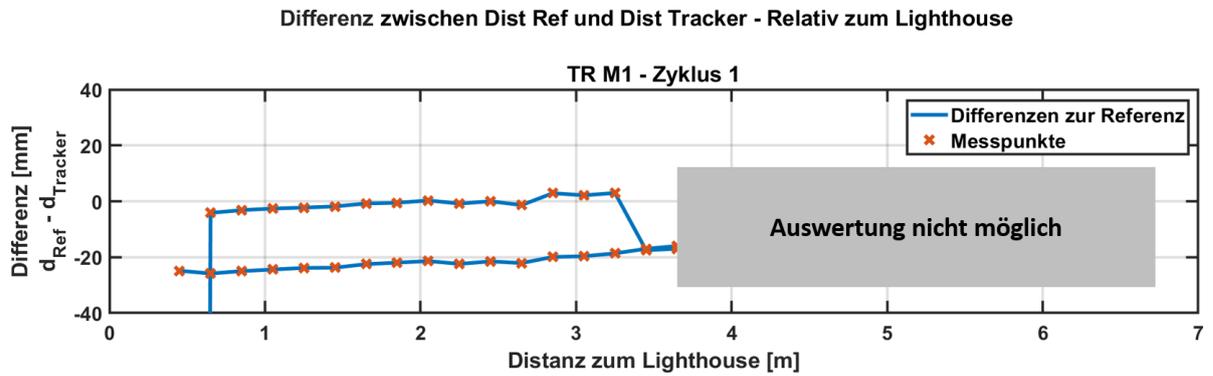


Abbildung 4.27: Messaufbau Bestimmung des Maßstabs

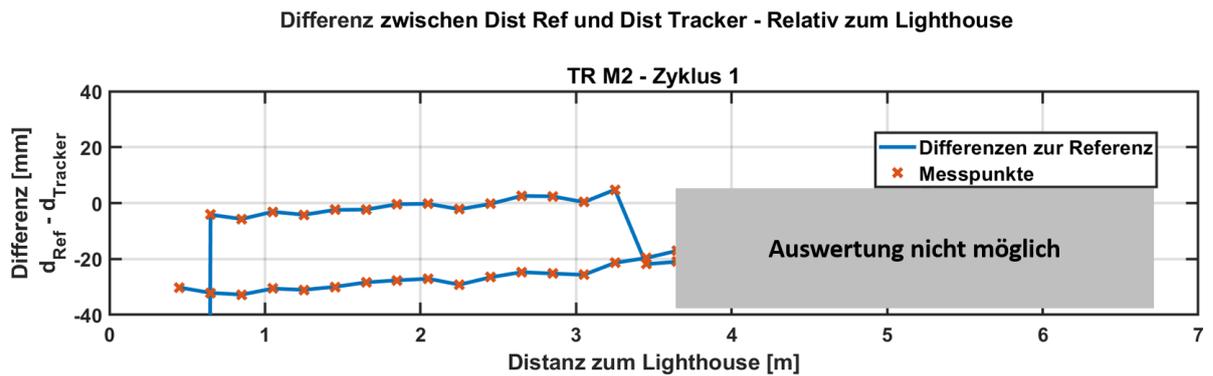
In der Abbildung 4.28 sind die Ergebnisse der ersten Zyklen der drei Tracker dargestellt. In den Abbildungen 4.28b und 4.28c fällt auf, dass die erste Messung bei einem Abstand von 0,45 m nicht möglich war. Das Beginnen der Messungen außerhalb des Messbereiches bewirkt außerdem einen Offset der Messungen, welcher erst bei einem Abstand von ca. 3,5 m wegfällt. Durch den zusätzlichen Tracker kann ausgeschlossen werden, dass es sich hierbei um Sprünge des Koordinatensystems handelt, da sich dessen Koordinaten nicht geändert haben. Bei den weiteren Zyklen der Tracker M1 und M2, sowie auch beim Tracker TU, war dieses Verhalten nicht zu erkennen. Auf die Ursachen für den Koordinatensprung wird in Abschnitt 4.5.2 genauer eingegangen. In diesem Abschnitt wird auch erläutert, warum der Versuchsaufbau *Komparator Distanz 2* in weiterer Folge nur bis zu einer Distanz von 3,5 m ausgewertet werden konnte.



(a) Tracker TU



(b) Tracker M1



(c) Tracker M2

Abbildung 4.28: Vergleich der Messbereichsüberprüfung mit einer Startdistanz von 0,45 m

4.3.3 Wiederholbarkeit der Messungen

Bei den Versuchen *Komparator Distanz 1* und *Komparator Distanz 2* wurden jeweils eine Hin- und eine Rückmessung durchgeführt. Durch die Positionierung mittels Interferometer ist außerdem gegeben, dass Hin- und Rückmessung an der selben Position durchgeführt wurden. Diese Randbedingungen erlauben es, die Messergebnisse aus diesen Versuchen auch im Hinblick auf die Wiederholbarkeit der Positionsmessung zu untersuchen.

In Abbildung 4.29 sind die Differenzen zwischen den Abweichungen zur Referenz der Hin- und Rückmessung des Versuchsaufbaus *Distanz Komparator 1* dargestellt. Bis zum Abstand von 7 m sind Abweichungen von maximal 9 mm zu erkennen. Bis zu einem Abstand von 3,5 m beträgt die Maximaldifferenz 2,6 mm. Vernachlässigt man den Koordinatensprung im ersten Zyklus bei Tracker M1 und M2, bestätigt sich diese Größenordnung auch im auswertbaren Bereich des Versuchsaufbaus *Komparator Distanz 2* (Abbildung 4.30). Da beim Versuch *Komparator Distanz 2* mehrere Zyklen gefahren wurden, kann hier auch ein Vergleich der Zyklen durchgeführt werden. In Abbildung 4.31 sind die Differenzen zwischen den Zyklen 2 und 3 getrennt für Hin- und Rückmessung abgebildet. Der Zyklus 1 wurde aufgrund der Koordinatensprünge nicht verwendet. Die Differenzen zwischen den Hin- bzw. den Rückmessungen der einzelnen Zyklen sind mit ± 1 mm im auswertbaren Bereich deutlich geringer als die Differenzen zwischen Hin- und Rückmessung eines Zyklus. Dies lässt darauf schließen, dass die Berechnung der Position von den vorangegangenen Positionen abhängt.

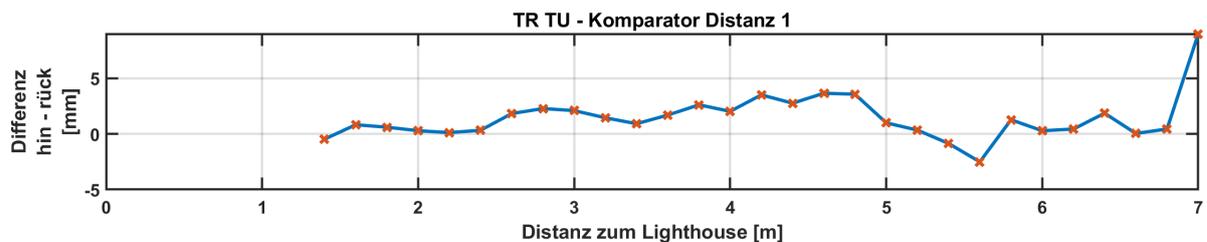


Abbildung 4.29: Differenz zwischen Hin- und Rückmessung für den Tracker TU - Versuchsaufbau Komparator Distanz 1

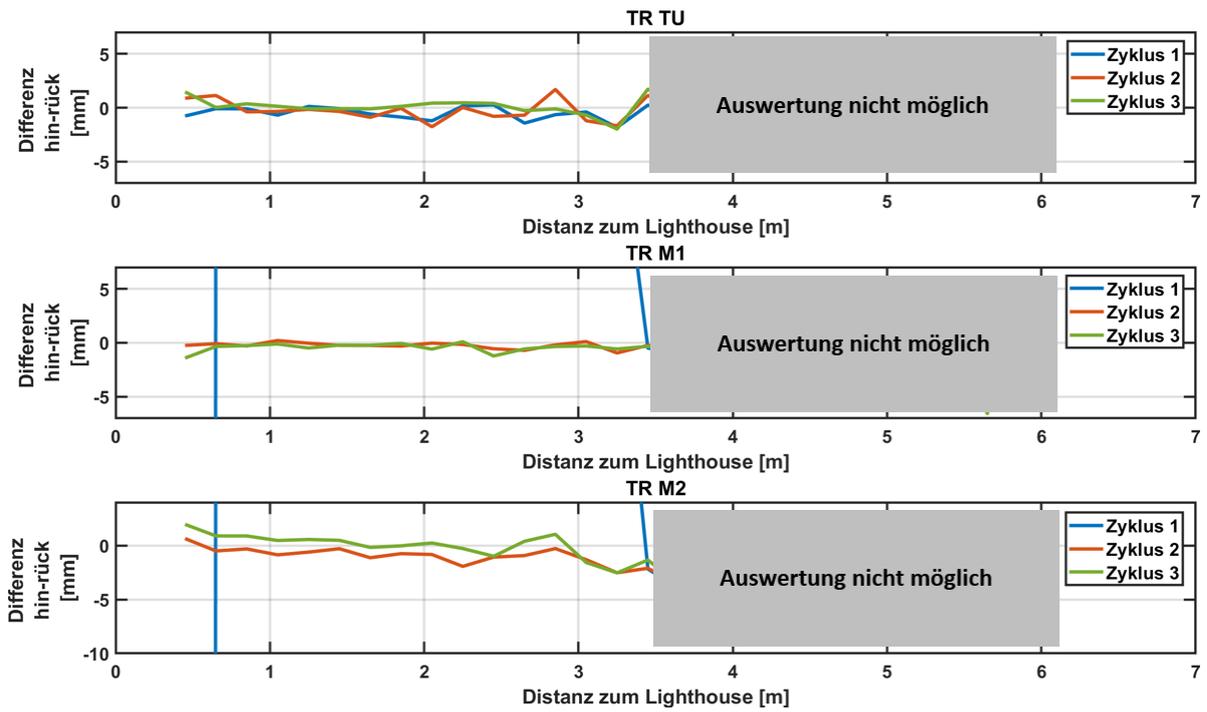


Abbildung 4.30: Differenz zwischen Hin- und Rückmessung für die Tracker TU, M1 und M2 - Versuchsaufbau Komparator Distanz 2

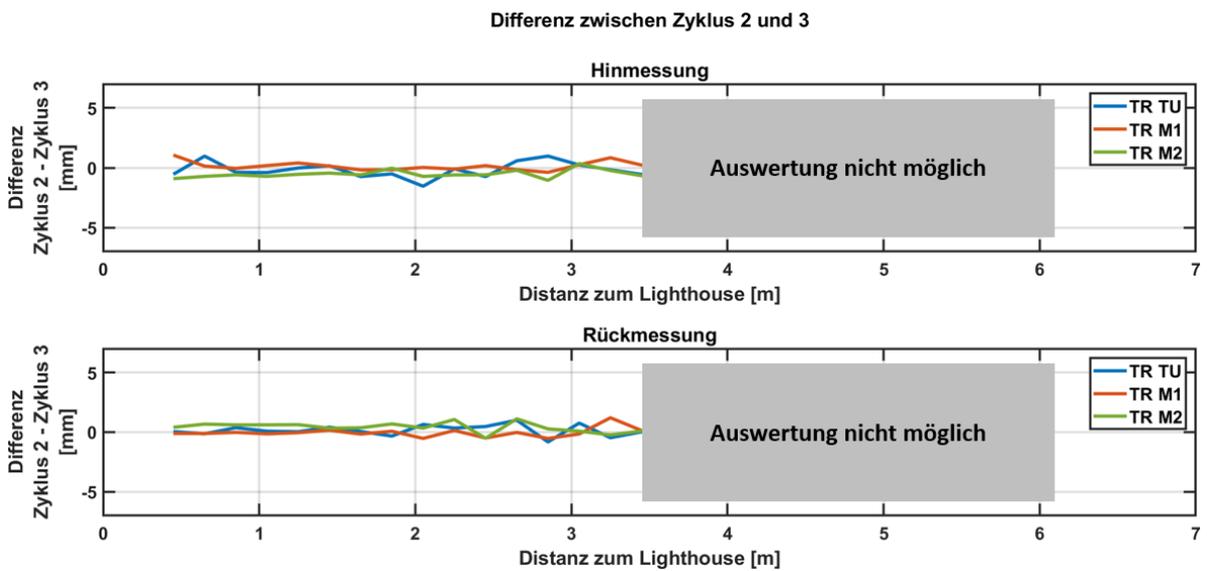


Abbildung 4.31: Differenz zwischen Zyklus 2 und 3, getrennt für Hin- und Rückmessung, für die Tracker TU, M1 und M2 - Versuchsaufbau Komparator Distanz 2

4.3.4 Maßstabsüberprüfung

In den Abbildungen 4.32 und 4.33 sind die Differenzen zwischen den gemessenen Werten und den Referenzwerten aus den beiden Versuchsaufbauten *Komparator Distanz 1* und *Komparator Distanz 2* dargestellt. Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, ist die Differenz zwischen den Zyklen minimal. Aus diesem Grund wurden für die Darstellung in der Abbildung 4.33 die Zyklen 2 und 3 gemittelt. Der Zyklus 1 wurde aufgrund des Koordinatensprungs nicht verwendet. Jede Datenreihe wurde vor der Mittelbildung auf den ersten dargestellten Messwert reduziert. Da der wahre Wert für die Distanz zwischen der ersten Messposition und dem Zentrum des Lighthouses nicht mit einer übergeordneten Genauigkeit bestimmt wurde, kann nicht festgestellt werden, ob die gemessenen Distanzen des VR-Systems zu kurz oder zu lang sind. Betrachtet man aber die Abbildung 4.32, kann die Aussage getroffen werden, dass die gemessenen Distanzen mit zunehmendem Abstand immer kürzer werden. Ab einer Distanz von 1 m bestätigt sich dies auch in der Abbildung 4.33. Beim Vergleich der Linien der unterschiedlichen Tracker in Abbildung 4.33 fällt auf, dass alle Tracker im auswertbaren Bereich einen ähnlichen Verlauf zeigen.

Aufgrund der Ergebnisse kann ausgesagt werden, dass das VR-System ein Maßstabsproblem hat. Die devicebezogenen Kennlinien sind reproduzierbar und zeigen eine annähernd gleiche Charakteristik. Außerdem bestehen reproduzierbare Differenzen zwischen Hin- und Rückmessung.

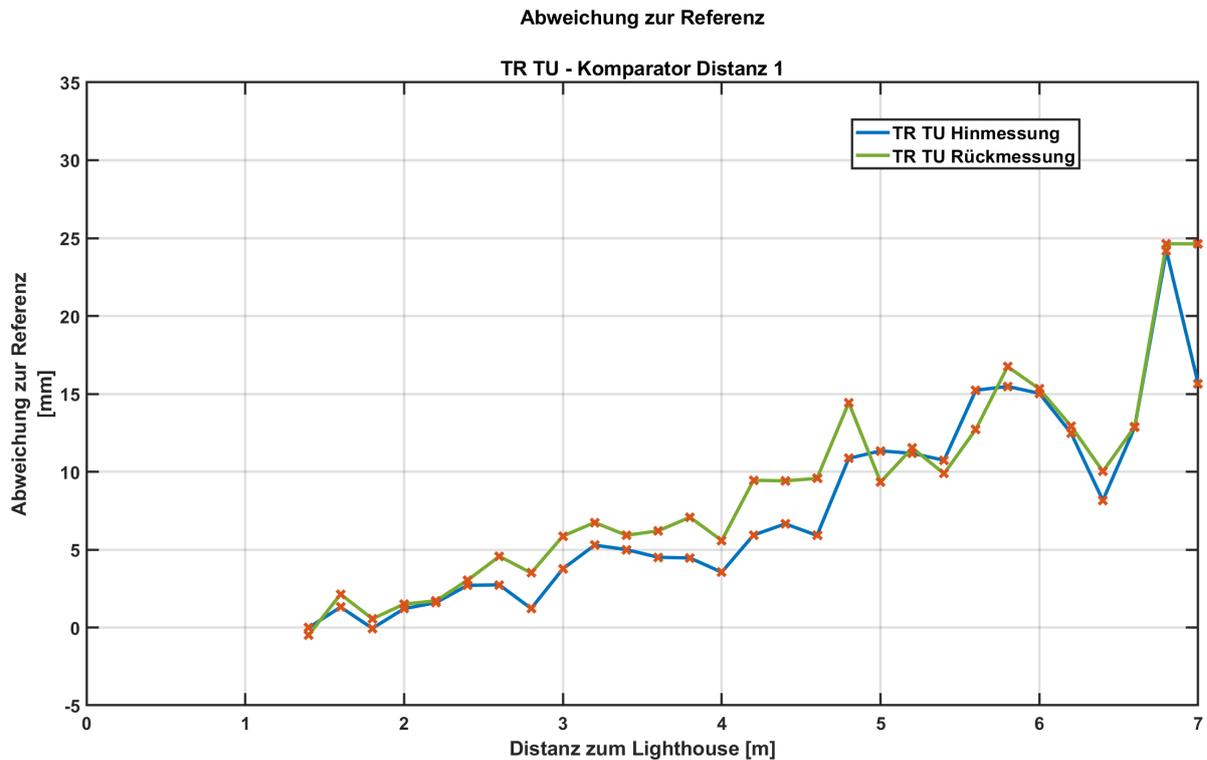


Abbildung 4.32: Abweichungen zur Referenz des Trackers TU - Versuchsaufbau Komparator Distanz 1

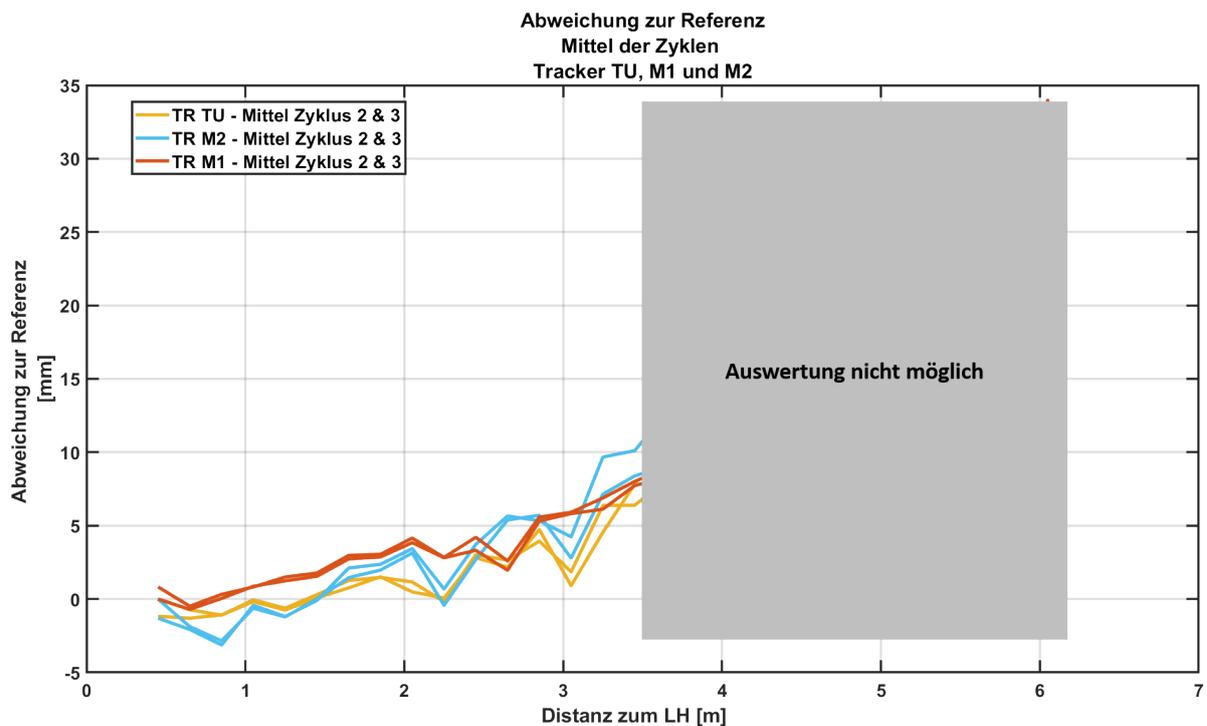


Abbildung 4.33: Abweichungen zur Referenz der Mittel der Zyklen 2 und 3 für die Tracker TU, M1 und M2 - Versuchsaufbau Komparator Distanz 2

4.3.5 Untersuchung auf rotationsabhängige Systematiken

Die theoretische Betrachtung des Messverfahrens (Abschnitt 3.3), kombiniert mit der unregelmäßigen Verteilung der Rezeptoren auf den Devices, lässt vermuten, dass die Ausrichtung der VR-Komponente zum Lighthouse eine Auswirkung auf die Positionsbestimmung hat. Im folgenden Abschnitt wird mit verschiedenen Messaufbauten versucht, diese offensichtlich systematischen Abweichungen zu bestimmen.

4.3.5.1 Messaufbau Rotationstest Tracker - 1 Lighthouse

Um den Einfluss der Ausrichtung des Trackers zu überprüfen, wurde der in Abschnitt 4.2.2.2 beschriebene umgebaute Theodolit Leica TM1100 verwendet. Der Tracker wurde, wie in Abbildung 4.34 ersichtlich ist, mittels dem in Abschnitt 4.2.3.1 beschriebenen Adapter (Steckzapfen auf Kameragewinde) am TM1100 befestigt. Die Ausrichtung erfolgte so, dass die Nullrichtung des TM1100 mit der negativen Z-Achse übereinstimmte, dies wurde über die Ausrichtung der USB-Buchse realisiert. Das Lighthouse wurde in ca. 2 m Entfernung mit maximaler Stativhöhe aufgestellt. Der Tracker wurde am TM1100 mit einer Schrittweite von 1 gon um drei volle Umdrehungen im Kreis gedreht.

Die Ansteuerung sowie die Aufzeichnung wurden für diese Überprüfung vollständig automatisiert. Dazu wurde die Matlab-Routine, welche für die Ansteuerung des TM1100 am Institut bereits vorhanden war, mit der Ansteuerung des VR-Systems per TCP/IP kombiniert. Dadurch war es möglich, nach jedem Schritt 20 Messungen des Trackers auszulösen. Da die 20 Messungen einzeln über TCP/IP ausgelöst worden sind, war die Messfrequenz hier deutlich geringer und betrug im Schnitt 10 Hz.

In der Abbildung 4.35a sind die Abweichungen vom Mittelwert in der X-Z-Ebene dargestellt. Wie schon beim Messrauschen ist eine eindeutige Ausrichtung der Abweichungen erkennbar. Vergleicht man die Ausrichtung mit dem Lageplot in Abbildung 4.35b wird klar, dass auch die systematischen

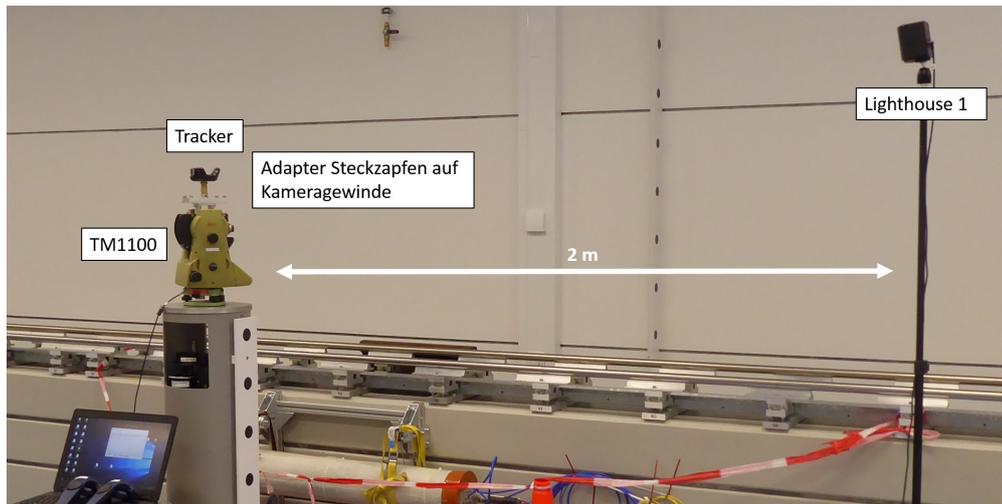
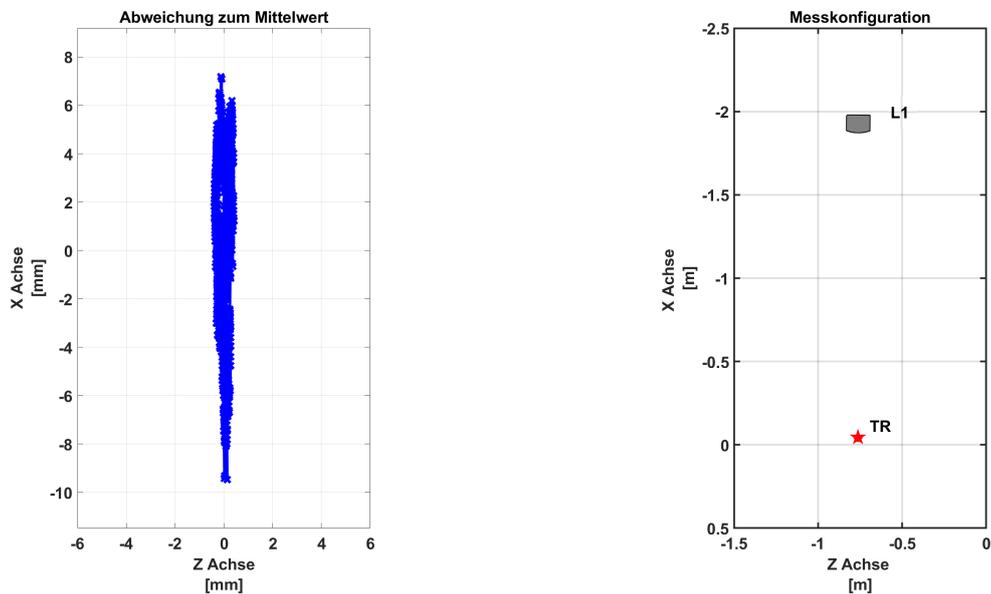


Abbildung 4.34: Messaufbau Rotationstest Tracker auf Leica TM1100



(a) Abweichungen zum Mittelwert in der XZ-Ebene

(b) Konfiguration Messaufbau

Abbildung 4.35: Rotationstest Tracker - 1 Lighthouse

Abweichungen, welche durch die Rotation verursacht werden, auf das Lighthouse ausgerichtet sind. Dadurch, dass die X-Achse parallel zur Verbindungslinie zwischen Lighthouse und Tracker liegt, entsprechen die Abweichungen in Längs- und Querrichtung zum Lighthouse, welche in Abbildung 4.36 dargestellt sind, den Abweichungen der X- und Z-Achsen. In Längsrichtung zum Lighthouse ist deutlich eine sich periodisch wiederholende Abweichung erkennbar. Vergleicht man die Größenordnung der Abweichungen (± 10 mm) mit denen der statischen Messungen aus Abschnitt 4.3.1.4 fällt auf, dass die systematischen Abweichungen deutlich größer sind. Die Standardabweichungen an den Messpositionen (Abbildung 4.37) sind aber vergleichbar mit denen der statischen Messung (Abbildung 4.16c), unterliegen aber auch einer Systematik. In Abbildung 4.38 ist ersichtlich, dass in den Daten der Y-Achse ein Koordinatensprung enthalten ist, dessen Ursache nicht bestimmt werden konnte. Auf mögliche Ursachen der Koordinatensprünge wird in Kapitel 4.5.2 eingegangen. Aus diesem Grund wurden für die weiteren Berechnungen nur die Daten der zweiten und dritten Rotation verwendet.

In der Abbildung 4.39 sind die Abweichungen zwischen den Rotationszyklen, bezogen auf die erste

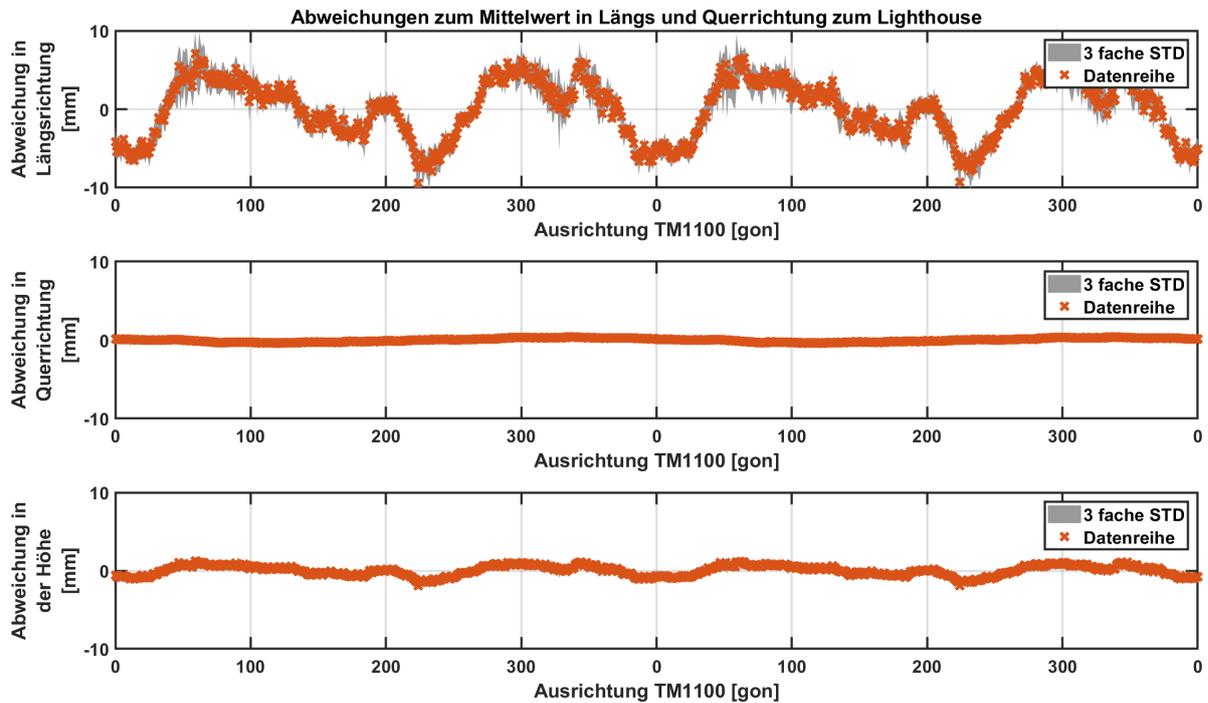


Abbildung 4.36: Rotationstest Abweichungen zum Mittelwert des Tracker in X, Y und Z-Achse Rotation 2 und 3

Rotation, der X-Achse (Abweichung in Richtung Lighthouse) dargestellt. Das verbleibende Restrauschen ist vergleichbar mit dem Messrauschen der statischen Messung aus Abschnitt 4.3.1.4. Um die gezeigten Ergebnisse zu verifizieren und den Einfluss der Messkonfiguration zu bestimmen, wurde der beschriebene Versuch mit unterschiedlichen Distanzen zum Lighthouse zwischen 0,9 m und 3,5 m wiederholt. Um die Datensätze vergleichen zu können, wurde jeweils eine Umdrehung pro Datensatz herangezogen. Die Fehler, welche durch die händische Ausrichtung gemacht wurden, konnten dadurch eliminiert werden, dass der Phasenversatz der Daten mittels Korrelation bestimmt und angebracht wurde. Alle Messungen, welche in Abbildung 4.40 zu sehen sind, wurden mit dem Tracker TU durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass die Range der Abweichungen mit der Distanz zunimmt (Tabelle 4.4). In der Abbildung 4.41 sind die selben Daten wie in Abbildung 4.40 dargestellt. Im Unterschied zur Darstellung in Abbildung 4.40 ist diese Darstellung über die Distanz zum Lighthouse normiert. Außerdem wurde die Kurve mit einem gleitenden Mittel geglättet. Die Fensterbreite von 20 Positionen entspricht, bei der gewählten Schrittweite der Rotationen von 1 gon, 20 gon. In dieser Darstellung ist deutlich zu erkennen, dass alle Kennlinien die gleiche Grundcharakteristik aufweisen.

Da durch die Kooperation mit Magna zwei weitere Tracker zur Verfügung standen, wurden auch Vergleiche zwischen den drei Trackern durchgeführt. Der Abstand bei dieser Rotation betrug bei allen drei Messungen ca. 2 m. In Abbildung 4.42 sind die Ergebnisse der Rotationen ersichtlich. Zusätzlich wurde auch die dreifache Standardabweichung eingezeichnet, um zu zeigen, dass es sich um einen signifikanten Unterschied handelt. Speziell zwischen 200 und 250 gon ist ein Unterschied von ca. 4 mm zwischen Tracker TU und den beiden Trackern von Magna ersichtlich. Der restliche Verlauf weist wieder eine ähnliche Charakteristik auf.

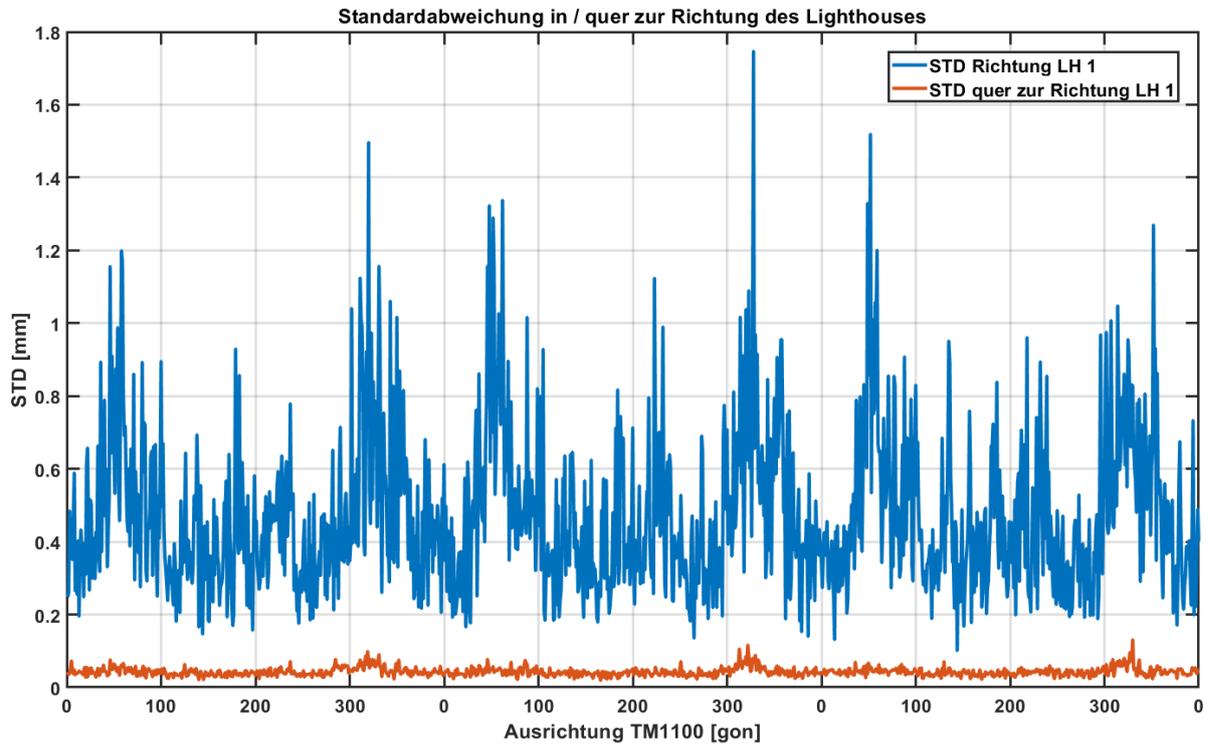


Abbildung 4.37: Standardabweichung in / quer zur Richtung des Lighthouses

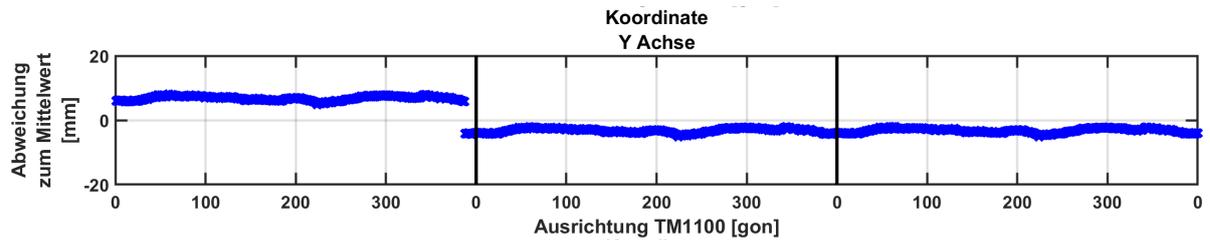


Abbildung 4.38: Rotationstest Abweichungen zum Mittelwert der Y-Achse der drei Rotationen

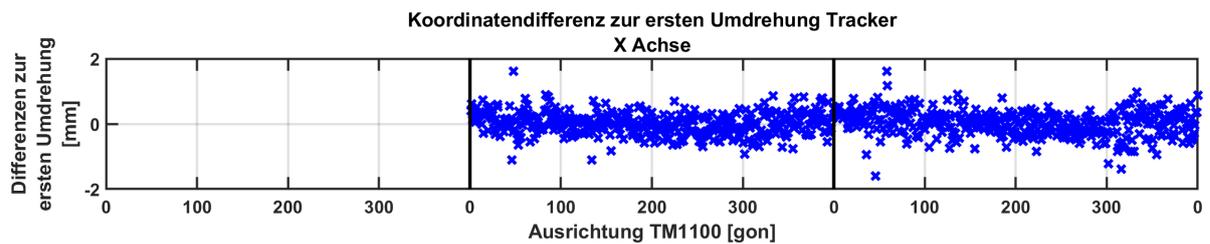


Abbildung 4.39: Rotationstest Abweichungen zur ersten Umdrehung

Tabelle 4.4: Größe der rotationsabhängigen Abweichungen des Trackers TU in Abhängigkeit der Distanz

	Rotationsabweichungen Tracker TU			
Distanz	0,94 m	1,89 m	2,86 m	3,52 m
Range	7,6 mm	14,9 mm	24,9 mm	33,0 mm

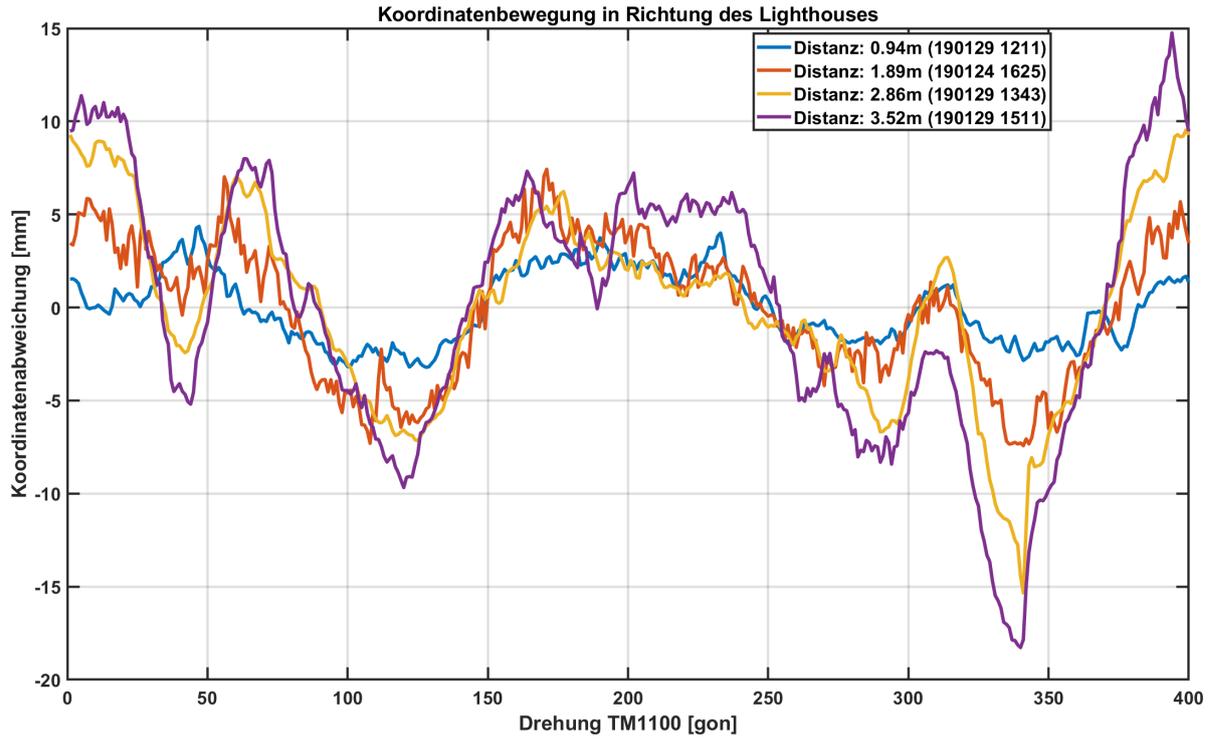


Abbildung 4.40: Vergleich der Rotationsabweichung bei unterschiedlichen Distanzen

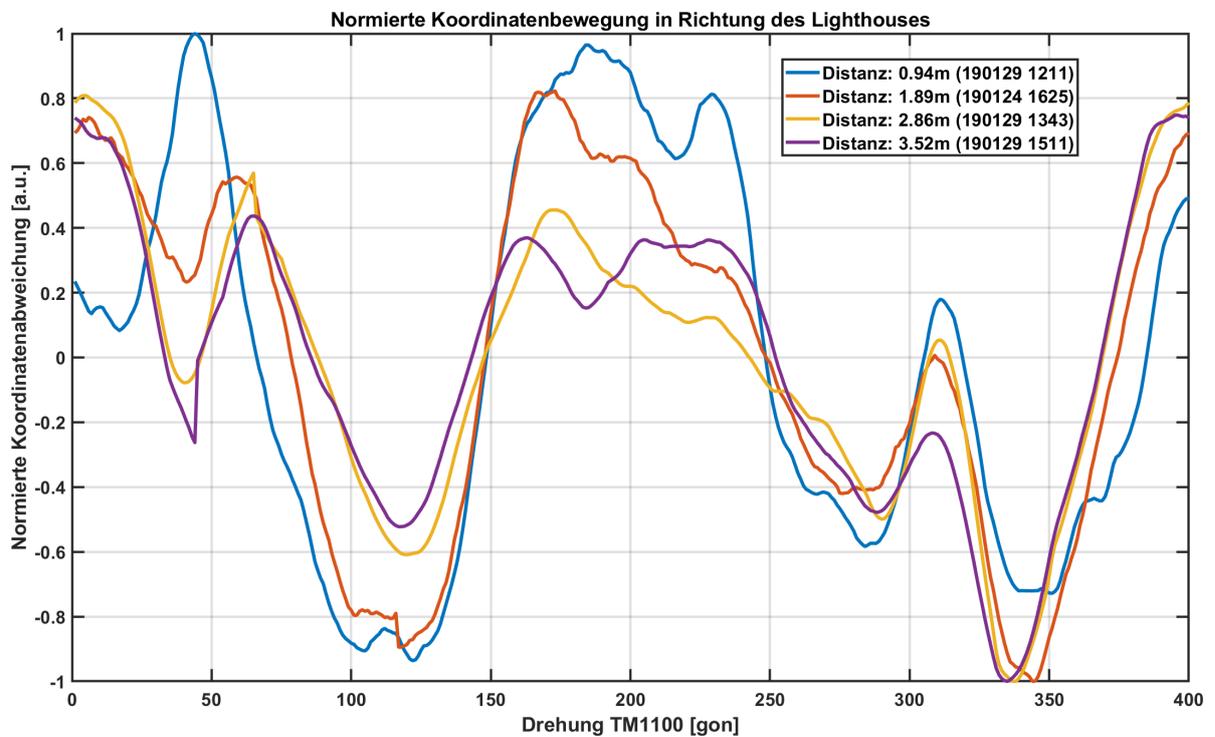


Abbildung 4.41: Vergleich der normierten Rotationsabweichung bei unterschiedlichen Distanzen

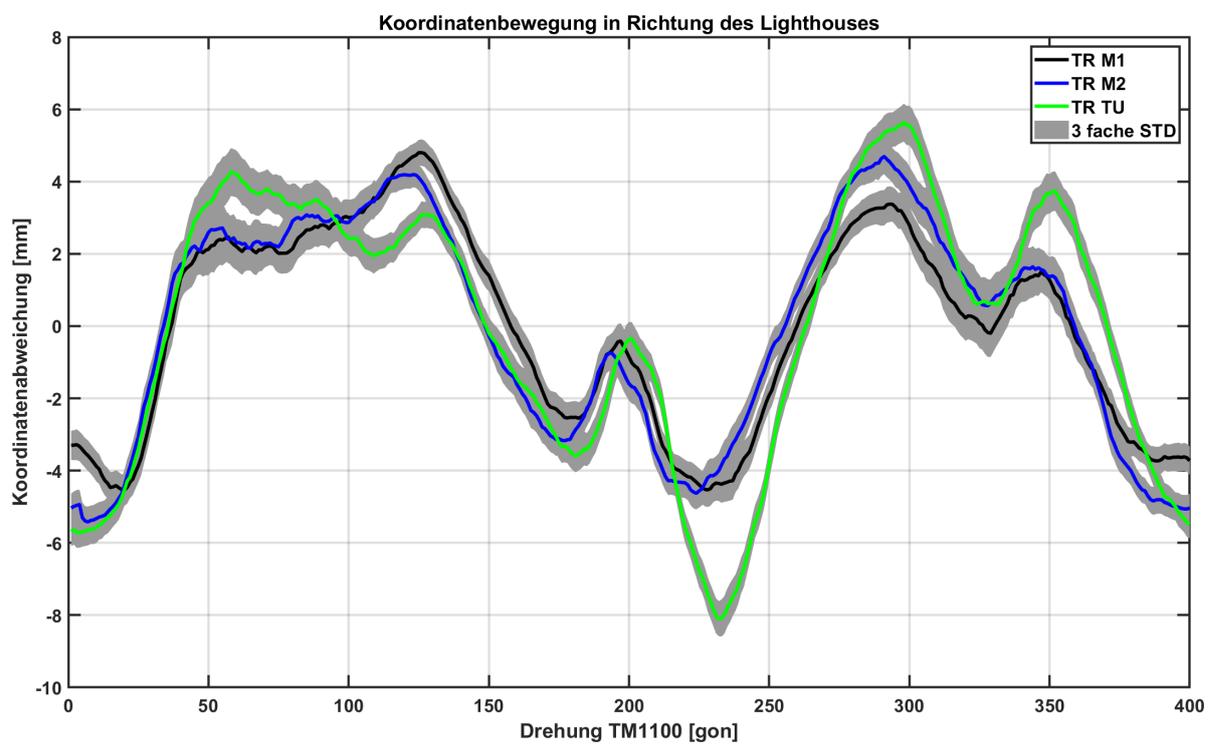


Abbildung 4.42: Vergleich der Rotationsabweichungen unterschiedlicher Tracker

4.3.5.2 Messaufbau Rotationstest Tracker - Ausfall einer Diode

Da die drei Tracker aus unterschiedlichen Serien stammen, liegt die Vermutung nahe, dass die Unterschiede in der Kennlinie durch Produktionsunterschiede, defekte Dioden oder eine schlechte Kalibrierung hervorgerufen werden.

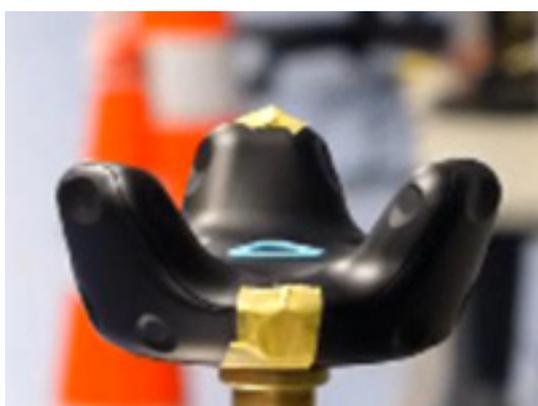
Um den Einfluss einer defekten Diode einschätzen zu können, wurden am Tracker M1 zwei Dioden abgeklebt und der Rotationstest wiederholt (Abbildung 4.43). Die Dioden wurden so ausgewählt, dass immer nur eine der beiden Sichtverbindung zum Lighthouse gehabt hätte. Um Auffälligkeiten im Verlauf der Abweichungen zuordnen zu können, wurde nach dem Rotationstest das Lighthouse durch eine Videokamera ersetzt und die Rotation erneut durchgeführt. Dadurch war es möglich, für jede Ausrichtung des Trackers das zugehörige Bild aus der Sicht des Lighthouses zu extrahieren. In Abbildung 4.44 ist zu erkennen, dass im Bereich zwischen 150 und 200 gon eine Abweichung von 3 mm auftritt. Die blau bzw. grün hinterlegten Bereiche markieren die Zeitfenster, in welchen eine der verdeckten Dioden vom Lighthouse aus gesehen wurde. Es ist davon auszugehen, dass die Überbestimmung durch die weiteren Dioden eine Abweichung im restlichen Sichtbereich abgefangen hat. Vergleicht man die Abweichung zwischen Tracker TU und den Trackern M1 und M2 in der Abbildung 4.42, ist zu erkennen, dass der Betrag sowie die Breite der Abweichung mit denen in der Abbildung 4.44 gut zusammenpasst. Somit wäre eine ausgefallene Diode beim Tracker TU eine mögliche Erklärung für die Unterschiede der Tracker.



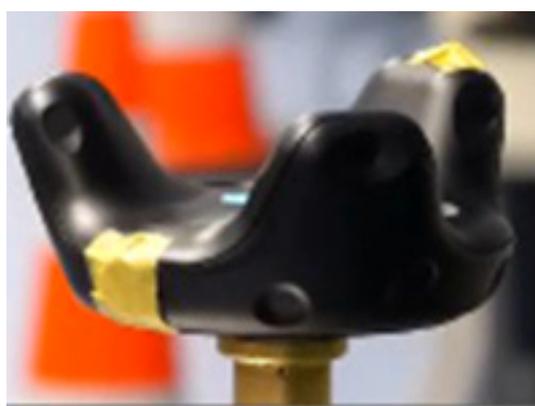
(a) 0gon



(b) 150gon



(c) 200gon



(d) 250gon

Abbildung 4.43: Modifizierter Tracker bei unterschiedlichen Ausrichtungen

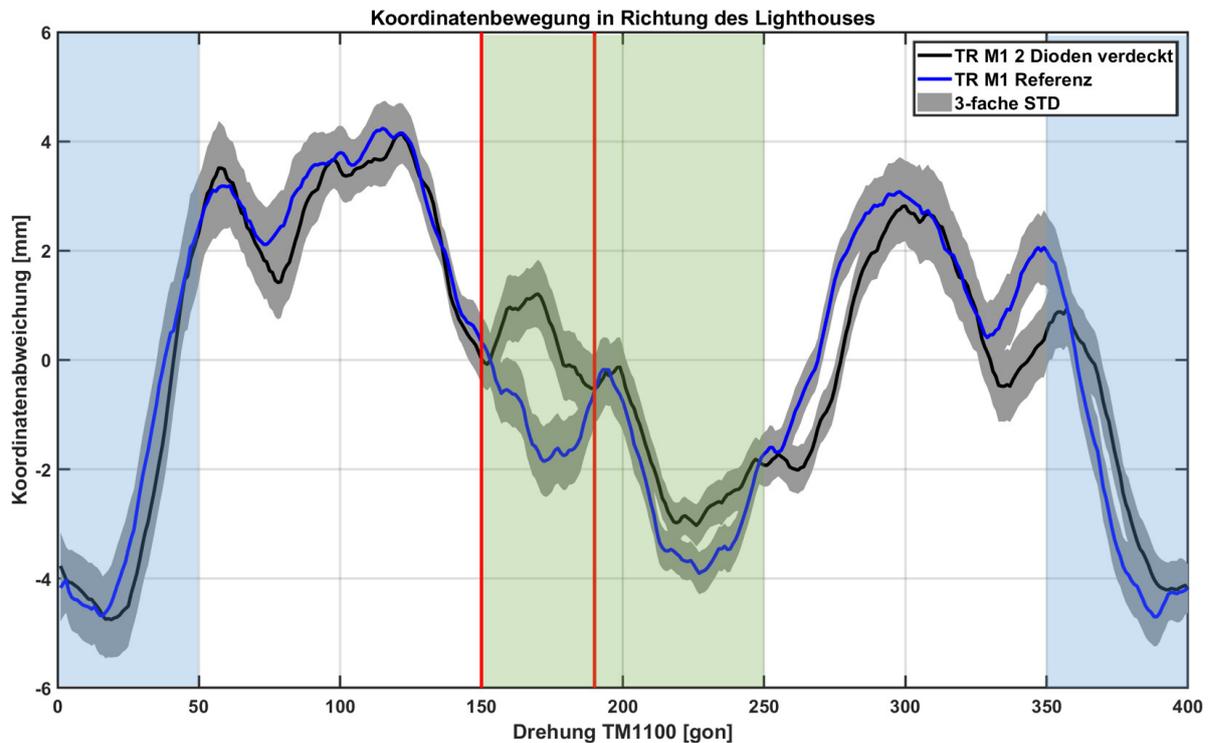


Abbildung 4.44: Auswirkung einer abgedeckten Diode auf die Rotationsabweichungen

4.3.5.3 Überprüfung des Koordinatenzentrums des Trackers

Laut dem Hersteller liegt der Koordinatenursprung des Trackers im Schnittpunkt der Gewindeachse des Kameragewindes und der Ebene der Grundplatte des Trackers (Abbildung 3.5). Die Lage der Gewindeachse lässt sich mit den beschriebenen horizontalen Rotationen leicht überprüfen, da der Befestigungspunkt auf der Adapterplatte in der Stehachse des TM1100 liegt (Abbildung 4.3a).

Anhand der Daten aus dem Versuch in Abschnitt 4.3.5.1 könnte eine Exzentrizität des Trackers in den Abweichungen, welche quer zum Lighthouse ausgerichtet sind, abgelesen werden. Diese würden sich in diesen Daten in Form einer periodischen Sinusschwingung darstellen.

Betrachtet man die vergrößerte Form dieser Querabweichungen in Abbildung 4.45, ist eine solche Schwingung mit einer Amplitude von 0,4 mm erkennbar. Bei der anschließenden Kontrolle des Adapters am TM1100 musste festgestellt werden, dass dieser eine mittels Zielfernrohr einer Totalstation festgestellte Exzentrizität von 0.4 mm aufweist. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass die dargestellten Abweichungen durch den Messaufbau verursacht wurden.

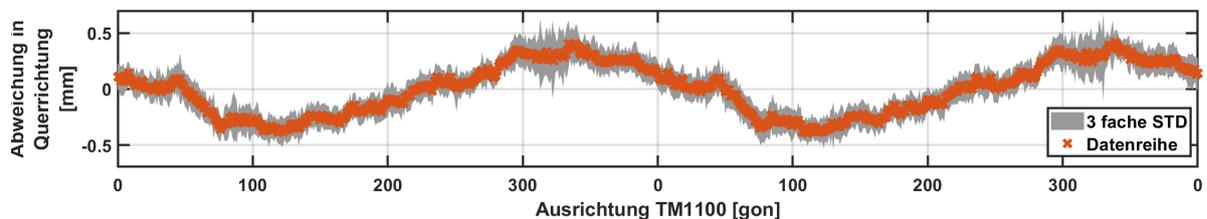


Abbildung 4.45: Rotationsabhängige Abweichung in der Lage - Quer zur Richtung zum Lighthouse

Für die Überprüfung des Höhennullpunktes des Trackers musste der Tracker um 90° verkippt am TM1100 montiert werden. Dadurch liegt die Ebene der Grundplatte parallel zur Stehachse des TM1100. Die einfachste Realisierung ergab sich durch eine Änderung des Vertikalwinkels des TM1100. Wie in Abbildung 4.46 zu sehen ist, konnte somit der bestehende Aufbau verwendet



Abbildung 4.46: Messaufbau Kontrolle des Koordinatenzentrums des Trackers

werden. Der Abstand zwischen dem Koordinatenzentrum des TM1100 und der Grundplatte wurde mit einer Schiebelehre auf 104 mm (Messgenauigkeit 0,1 mm) bestimmt. Aufgrund der Abschattung, welche vom TM1100 verursacht wird, war keine volle Rotation des Trackers möglich. Durch die Verkippung verlagert sich das Zentrum des Trackers nach außen und es entsteht im Lageplot der Abweichungen zum Mittelwert ein Halbkreis (Abbildung 4.47). Der Radius dieses Halbkreises sollte mit dem zuvor händisch gemessenen Wert übereinstimmen. Mithilfe passender Ausgleichsmethoden wurde der Radius des Halbkreises mit 103 mm bestimmt und weist somit eine Abweichung von 1 mm zum manuell gemessenen Wert auf. Aus den vorangegangenen Überprüfungen ist bekannt, dass es rotationsabhängige Abweichungen gibt, welche nicht symmetrisch bezüglich der halben Umdrehung sind. Da nur eine halbe Umdrehung gemessen werden konnte, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Abweichung zwischen Referenzwert und geschätztem Wert durch den Messaufbau bedingt ist. Somit konnte keine signifikante Abweichung zur Herstellerangabe festgestellt werden. Für weiterführende Anwendungen [Bauer, Jost und Lienhart, 2020] wurde deshalb als vertikaler Nullpunkt die Unterseite des Trackers angenommen.

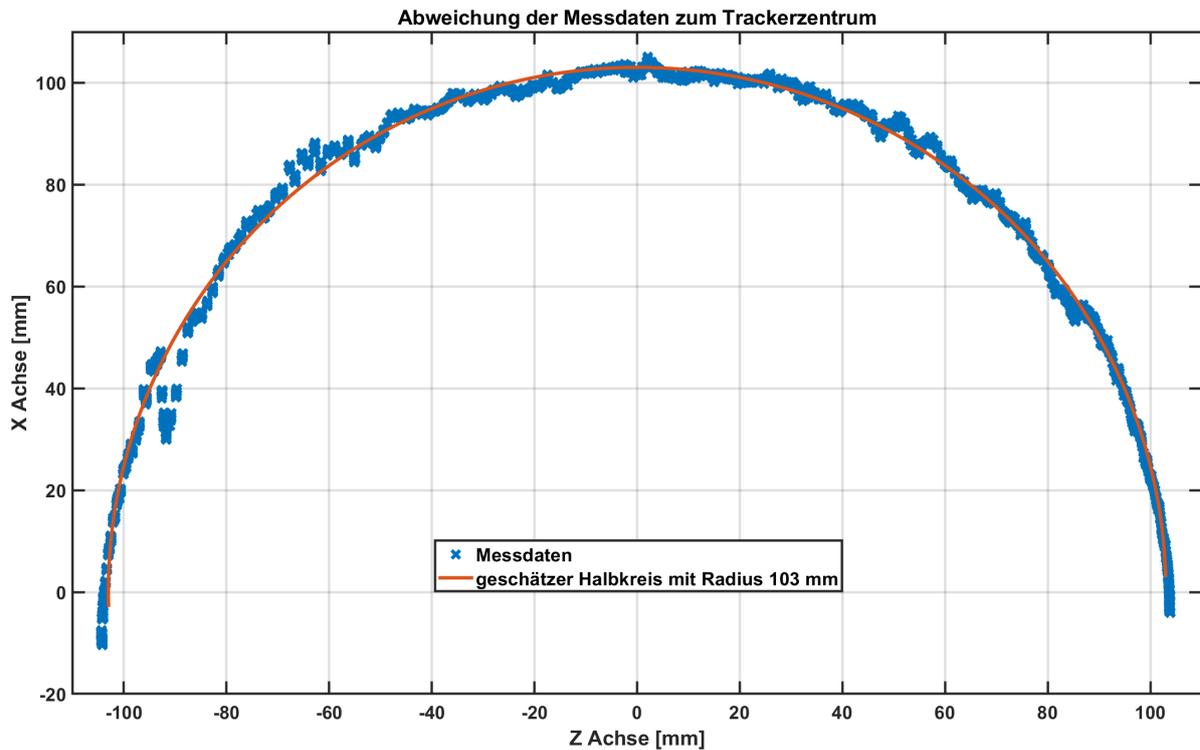


Abbildung 4.47: Lageplot der vertikalen Drehung mit geschätztem Halbkreis

4.3.5.4 Messaufbau Rotationstest Tracker - 2 Lighthouses

Bei der statischen Überprüfung von Tracker und Brille wurde festgestellt, dass unter gewissen Konfigurationen beide Lighthouses zur Berechnung der Position verwendet werden. Aus diesem Grund sollte auch der Einfluss des zweiten Lighthouses auf die Rotationsabweichungen untersucht werden. Die Konfiguration leitet sich aus den Ergebnissen der in Abschnitt 4.3.1.3 beschriebenen Rasteruntersuchung ab. Es wurden, wie in Abbildung 4.48 zu sehen ist, zwei Lighthouses in einem Abstand von 2 m zum Tracker und orthogonal zueinander aufgestellt. Die Ausrichtung der Lighthouses erfolgte auf den Tracker. Es wurde zusätzlich darauf geachtet, dass die Lighthouses sich auch gegenseitig sehen, da vermutet wird, dass dies zu einer verbesserten Stabilität des Koordinatensystems beiträgt.

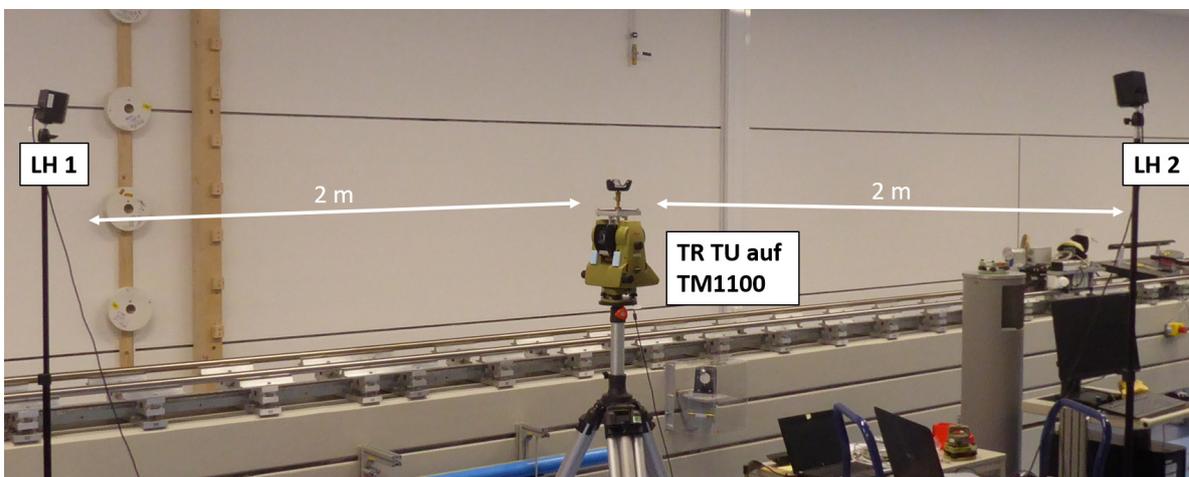


Abbildung 4.48: Messaufbau Rotationstest Tracker - 2 Lighthouses

Für die Auswertung wurde das Koordinatensystem so transformiert, dass die Koordinatenachsen mit den Richtungen zu den Lighthouses zusammenfallen. In Abbildung 4.49 sind die Standardabweichungen der Messpositionen dargestellt. Da die Standardabweichungen in beiden Achsen die selbe Größenordnung aufweisen, ist davon auszugehen, dass zur Berechnung der Trackerposition beide Lighthouses verwendet wurden. Würde sich die Positionsbestimmung nur auf ein Lighthouse stützen, würde, wie in Abschnitt 4.3.1.4 erläutert wurde, der Unterschied zwischen den Standardabweichungen deutlich größer sein (Faktor 5 bis 10). Vergleich man die Abbildung 4.49 mit den Standardabweichungen bei der Rotation mit einem Lighthouse 4.37, ist dieser Unterschied deutlich zu erkennen.

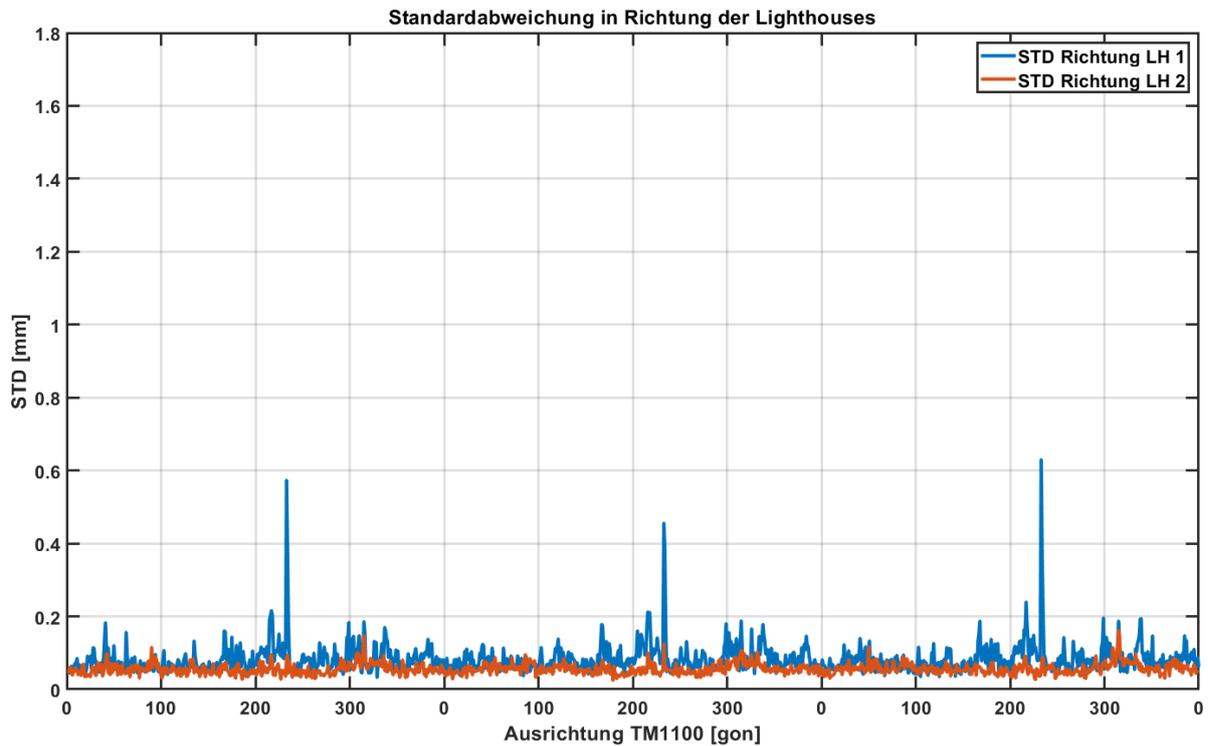


Abbildung 4.49: Standardabweichung in Richtung der beiden Lighthouses

Aufgrund der verbesserten Werte der Standardabweichungen der Messpositionen wird erwartet, dass durch die Verwendung beider Lighthouses auch eine Verbesserung der Abweichungen, welche durch die Rotation hervorgerufen werden, entsteht. Betrachtet man die Abweichungen in der Lage in Abbildung 4.50, erinnert dieses Bild sehr an die Abweichungen in der Lage, welche bei den Messungen mit nur einem Lighthouse in Abschnitt 4.3.5.1 aufgetreten sind.

Auch beim Vergleich der Abweichungen der einzelnen Achsen (Abbildung 4.36 und Abbildung 4.51) zeigt sich ein ähnliches Bild bei den Versuchen *Rotationstest Tracker - 1 Lighthouse* und *Rotationstest Tracker - 2 Lighthouses*.

Der Vergleich der beiden Versuchsaufbauten hat somit bestätigt, dass bei gewissen Konfigurationen beide Lighthouses einen Einfluss auf die Positionsbestimmung haben und sich das Messrauschen einer statischen Position deutlich verringert.

Auf die im Vergleich zum Messrauschen deutlich größeren systematischen Abweichungen, welche durch die Rotation des Trackers verursacht werden, hat die Verwendung des zweiten Lighthouses allerdings keinen Einfluss.

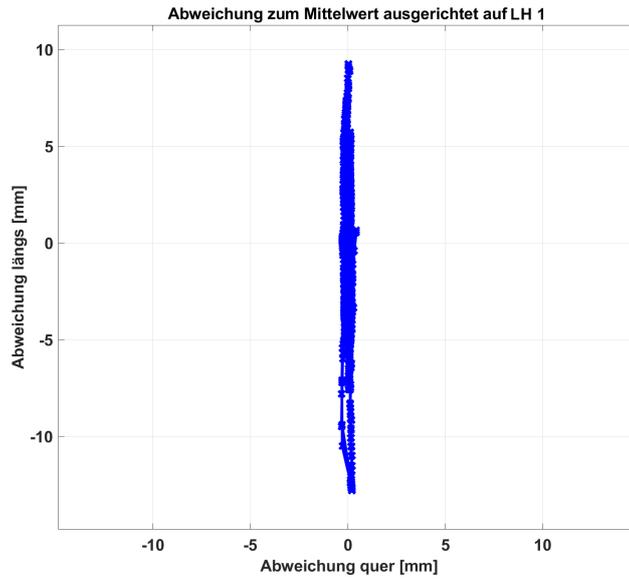


Abbildung 4.50: Abweichungen zum Mittelwert in der XZ-Ebene bei Rotation mit 2 Lighthouses

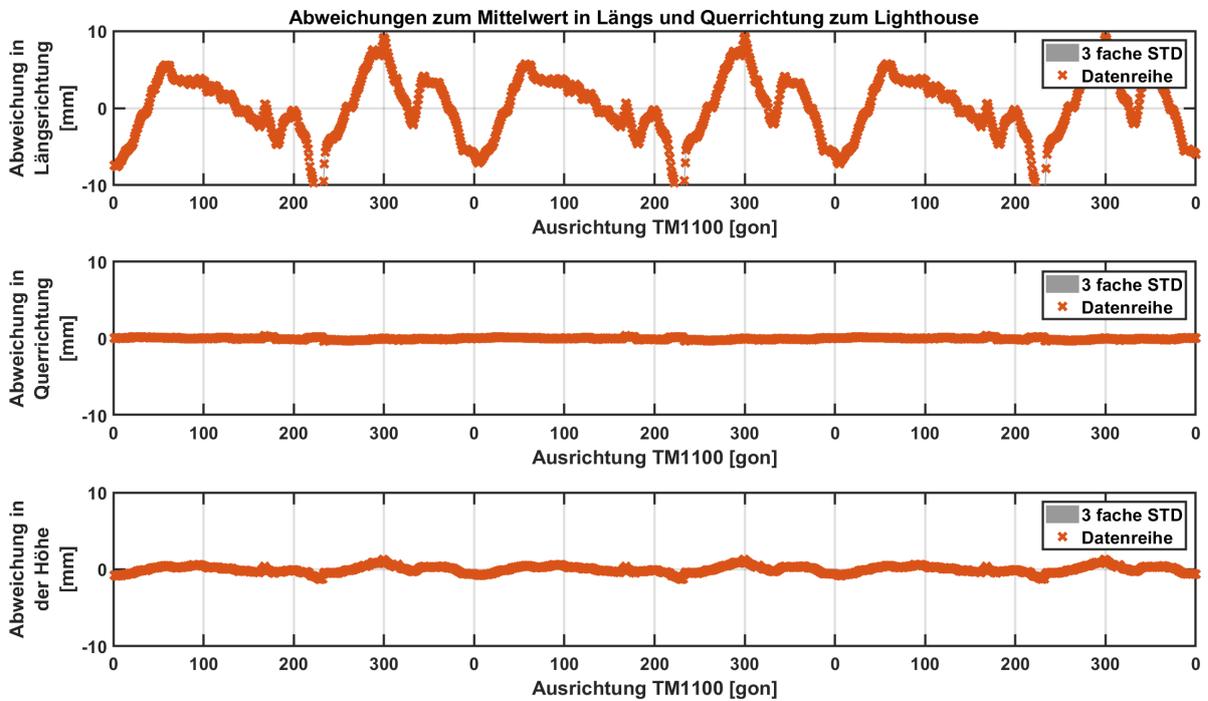


Abbildung 4.51: Abweichungen zum Mittelwert in Richtung der beiden Lighthouses und Höhe bei Rotation mit 2 Lighthouses

4.3.5.5 Messaufbau Rotationstest Controller

Da aufgrund der Messergebnisse des Trackers davon ausgegangen werden muss, dass auch die restlichen VR-Komponenten mit rotationsabhängigen Abweichungen behaftet sind, wurde der Testaufbau für den Controller adaptiert und der Controller mit dem in Abschnitt 4.2.3.2 beschriebenen Adapter am TM1100 befestigt (Abbildung 4.52). Da das Koordinatenzentrum des Controllers nicht bekannt war, war es nicht möglich, den Adapter so auszurichten, dass dieses in der Rotationsachse lag. Das Lighthouse wurde, wie auch zuvor, so angebracht, dass es von schräg oben auf den Controller ausgerichtet war. Der Abstand betrug auch für diesen Versuch ca. 2 m.

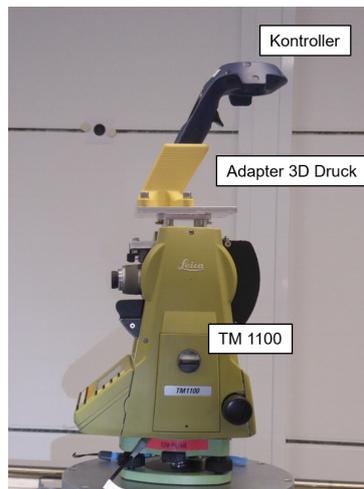
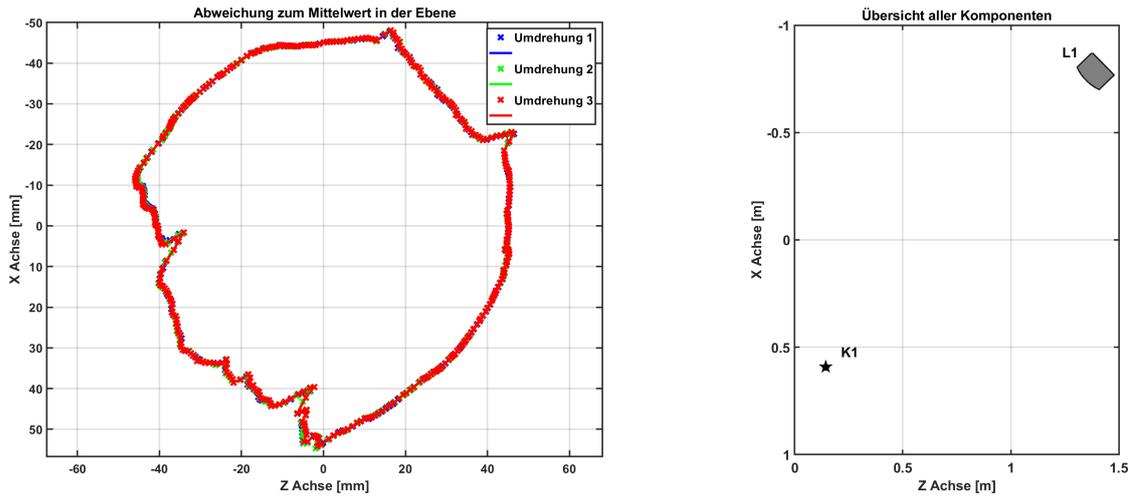


Abbildung 4.52: Messaufbau Rotationstest Controller

Wie in Abbildung 4.53a zu sehen ist, ist es nicht gelungen, das Trackerzentrum in der Rotationsachse zu positionieren, weshalb kreisförmige Abweichungen zum Mittelwert auftreten. Allerdings ist trotz der großen Abweichungen eine Ausrichtung in Richtung des Lighthouses zu erkennen. In Abbildung 4.54 sind die Differenzen zwischen den Rotationen dargestellt. Hier ist, wie auch schon zuvor beim Tracker, zu erkennen, dass die Messungen sehr reproduzierbar sind. Die Restabweichungen sind im Vergleich zum Tracker (Abbildung 4.39) aber geringer und nicht so gleichmäßig verteilt.

Für die weitere Analyse der Daten musste der Einfluss der Exzentrizität eliminiert werden. Dazu wurde das Koordinatensystem parallel zur Verbindungslinie zwischen Tracker und Lighthouse gedreht und somit wurden die Abweichungen in Längs- und Querrichtung zum Lighthouse unterteilt. Da aus den Vorversuchen bekannt ist, dass die Abweichungen der Rotation hauptsächlich in der Längskomponente sichtbar sind, wurde angenommen, dass es sich bei den Abweichungen in der Querkomponente um die Abweichungen durch die Exzentrizität handelt. Diese wurden mittels zwei phasenverschobenen Sinusschwingungen angesetzt und mittels Fast Fourier Transformation (FFT) bestimmt. Anschließend wurde die geschätzte Schwingung von den Abweichungen der Quer- und Längsrichtung (90° Phasenversatz) abgezogen. Dadurch ergeben sich die in Abbildung 4.55 dargestellten systematischen Abweichungen in Längsrichtung mit einer Range von 27,2 mm. Die Messung wurde anschließend mit dem zweiten Controller wiederholt. In der Abbildung 4.56 sieht man, dass auch bei den zwei Controllern die Charakteristiken des Abweichungsverlaufs gleich sind. In dieser Abbildung ist auch zu erkennen, dass bei beiden Controllern die Standardabweichung im Bereich 150 bis 200 gon deutlich erhöht ist. Betrachtet man die Abbildung 4.57, erkennt man, dass der Controller bei 200 gon mit dem Griff zum Lighthouse zeigt. In dieser Position stehen weniger auf das Lighthouse ausgerichtete Dioden zur Positionsbestimmung zur Verfügung. Die höhere Standardabweichung bei beiden Controllern (Abbildung 4.56) könnte somit durch die geringere Anzahl an sichtbaren Dioden bzw. deren schlechte Lage zueinander begründet sein.



(a) Abweichung zum Mittelwert des Controllers K1 bei 360° Drehung (b) Konfiguration des Messaufbau

Abbildung 4.53: Rotationstest Controller K1

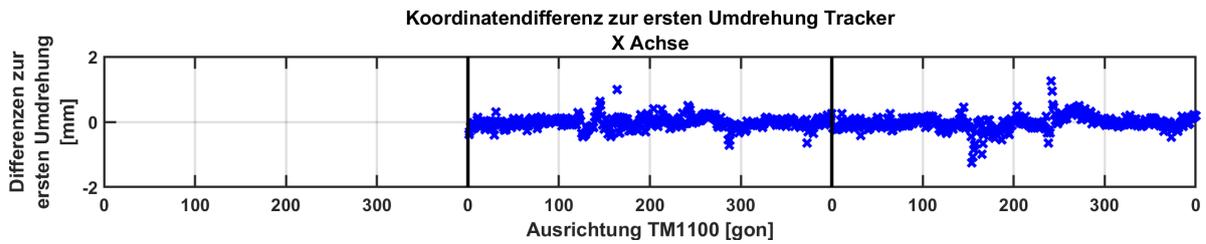


Abbildung 4.54: Differenzen zur ersten Umdrehung des Controllers K1

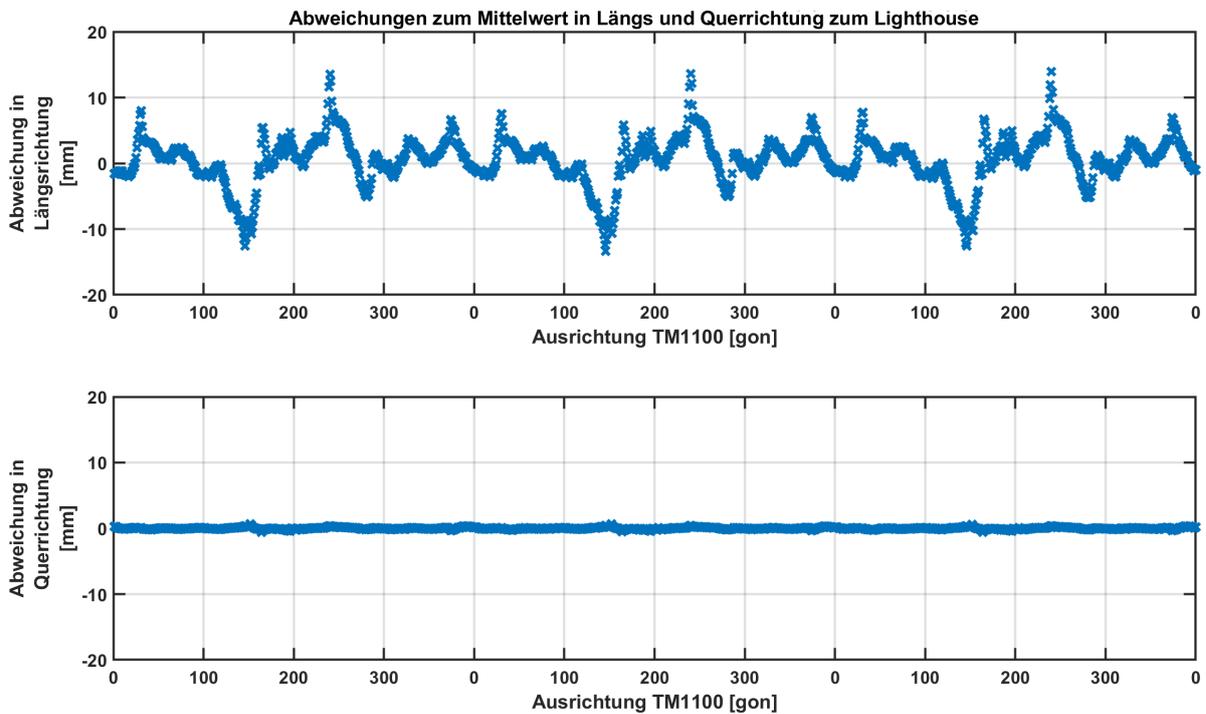


Abbildung 4.55: Abweichungen in Längs- und Querrichtung zum Lighthouse

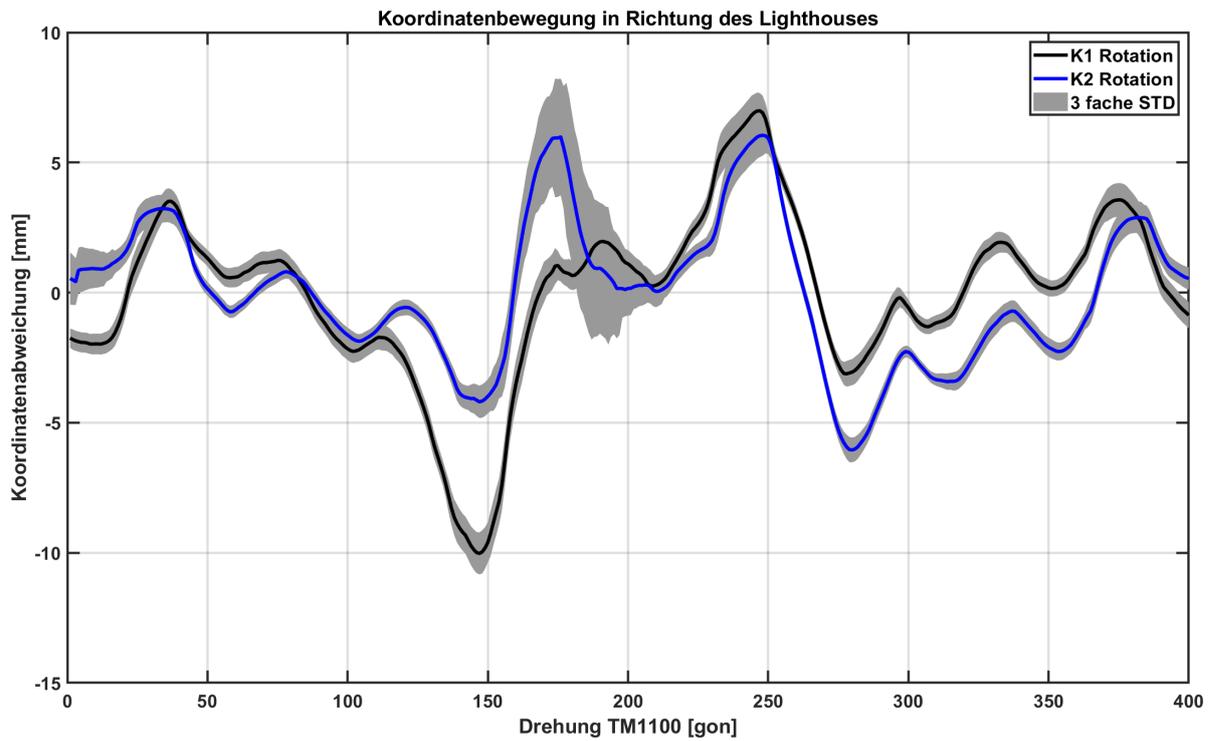


Abbildung 4.56: Abweichungen in Längs- und Querrichtung zum Lighthouse - Vergleich der Controller



(a) 0gon



(b) 100gon



(c) 200gon



(d) 300gon

Abbildung 4.57: Controller in unterschiedlichen Ausrichtungen zum Lighthouse in der Halterung mit hervorgehobenen Dioden (grün = auf das LH ausgerichtet, rot = sichtbar, aber anders ausgerichtet)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Verhalten des Controllers in Bezug auf die rotationsabhängigen Abweichungen vergleichbar mit dem des Trackers ist. Nach der Elimination der Abweichungen, welche durch den Versuchsaufbau bedingt sind, gibt es weiterhin große Abweichungen in Richtung des Lighthouses. Der Vergleich zwischen den beiden Controllern hat ergeben, dass der Verlauf der Abweichungskurve eine ähnliche Grundcharakteristik aufweist. Es hat sich außerdem gezeigt, dass die geringere Anzahl an Dioden im Bereich des Griffs Auswirkungen auf die Standardabweichung und die Abweichungen zum Mittelwert hat.

4.3.5.6 Messaufbau Rotationstest HMD

Für die Überprüfung der Brille war das Konzept der Messungen von Tracker und Controller aufgrund der Bauform nicht direkt anwendbar. Die Brille wurde mit dem Adapter aus Abschnitt 4.2.3.3 am TM1100 befestigt (Abbildung 4.58). Da es aufgrund des Aufbaus bei der üblichen Konfiguration bei einer vollen Umdrehung zu Abschattungen kommen würde, wurde die Höhendifferenz zwischen Lighthouse und HMD verändert. Die Brille wurde auf einem niedrigeren Pfeiler aufgestellt. Dadurch war es möglich, dass das Lighthousesignal auch auf der abgewandten Seite ausreichend Dioden erreichte. Da das HMD kabelgebunden ist, waren auch mehrere Drehungen in die selbe Richtung nicht möglich. Aus diesem Grund wurde die Brille abwechselnd im und gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Dies wurde zwei Mal wiederholt. Dadurch stehen Daten von insgesamt vier vollen Rotationen zur Verfügung. Das Eliminieren der durch die Exzentrizität erzeugten Abweichungen wurde wie zuvor beim Controller durchgeführt. Die Abweichungen der Brille nach der Elimination (Abbildung 4.59) sind nicht so eindeutig ausgerichtet wie zuvor bei den Messungen des Trackers und des Controllers. Dieses Verhalten ist vermutlich auf die unterschiedliche Anzahl und Konfiguration der Dioden zurückzuführen. Betrachtet man die in Abbildung 4.60 dargestellten Differenzen zwischen den Rotationen, fällt auf, dass es Unterschiede zwischen den Rotationen gibt. Die Ursache dafür liegt vermutlich in der Drehrichtung. Der Unterschied zwischen Rotation 1 und 3 ist deutlich geringer als zwischen Rotation 1 und 2 bzw. 1 und 4, welche in die andere Richtung gedreht worden sind. Diese Beobachtung bestätigt die Vermutung, welche bereits in Abschnitt 4.3.2 aufgestellt wurde, dass die Historie in die Punktberechnung miteinbezogen wird. Auch in Abbildung 4.61 ist eine Symmetrie der Abweichung bezüglich der Umkehrpunkte bei 0 gon zu erkennen. Auffällig sind auch die systematischen Restabweichungen quer zur Richtung zum Lighthouse. Diese Spitzen sind vermutlich durch die schlechte Sichtbarkeit auf der abgewandten Seite zu erklären. Dasselbe gilt auch für die hohen Abweichungen in Längsrichtung. Auffällig sind auch die geringen Abweichungen im Bereich zwischen ± 80 gon. Die Vermutung, dass in diesem Bereich das Messverhalten deutlich besser ist, bestätigen auch die geringen Standardabweichungen (Abbildung 4.62).

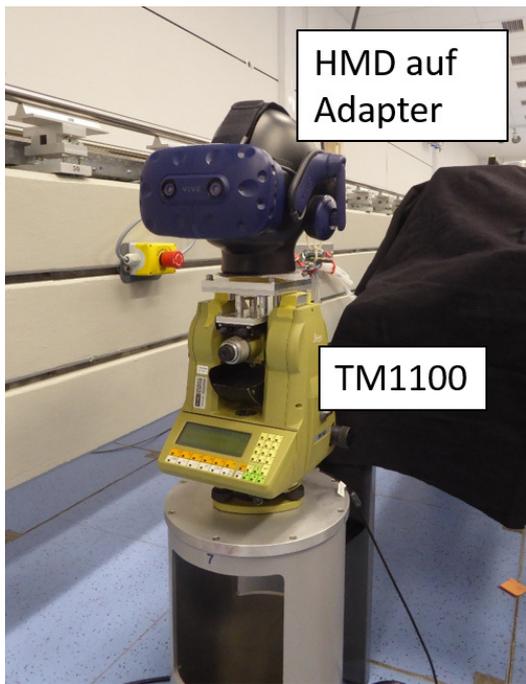


Abbildung 4.58: Messaufbau Rotationstest HMD

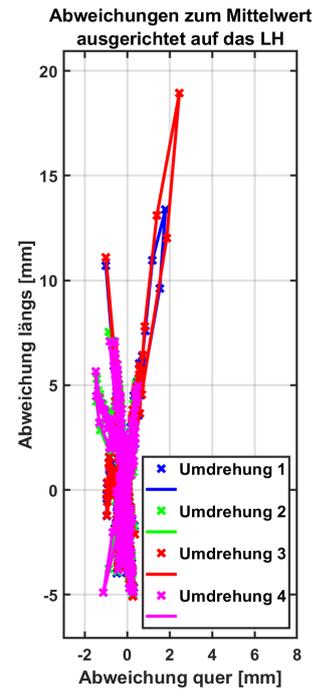


Abbildung 4.59: Abweichungen zum Mittelwert des HMD ausgerichtet auf das Lighthouse

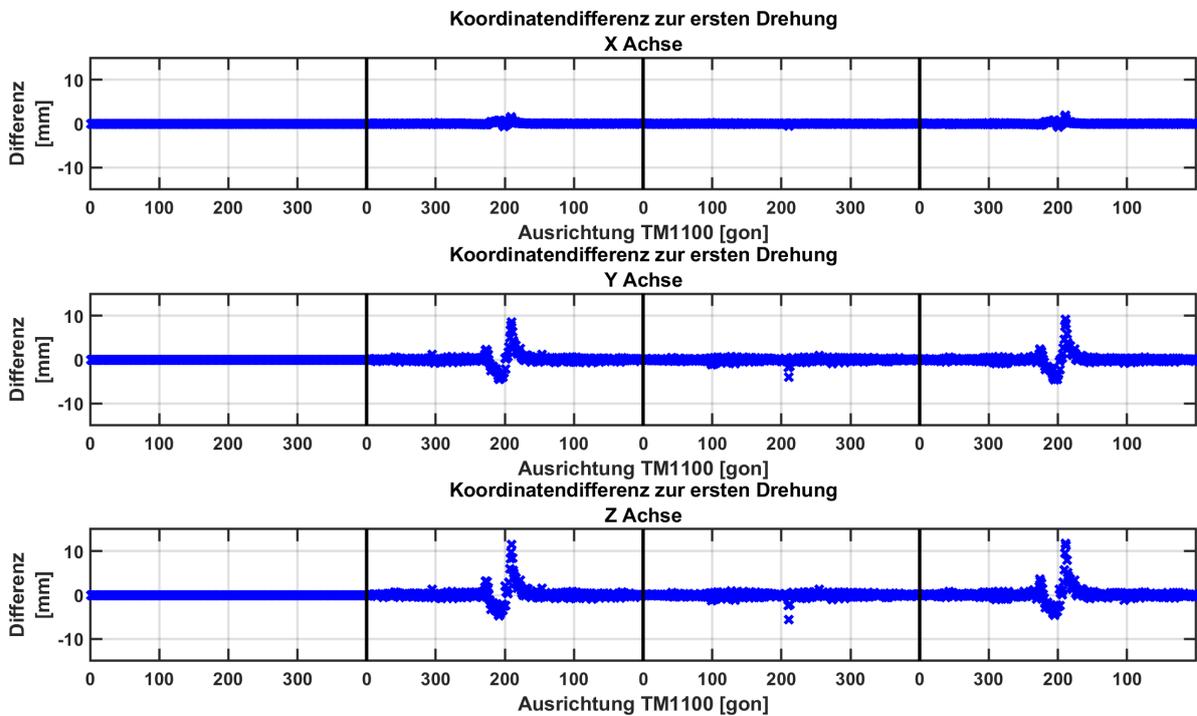


Abbildung 4.60: Differenz zwischen den Rotationen des HMD

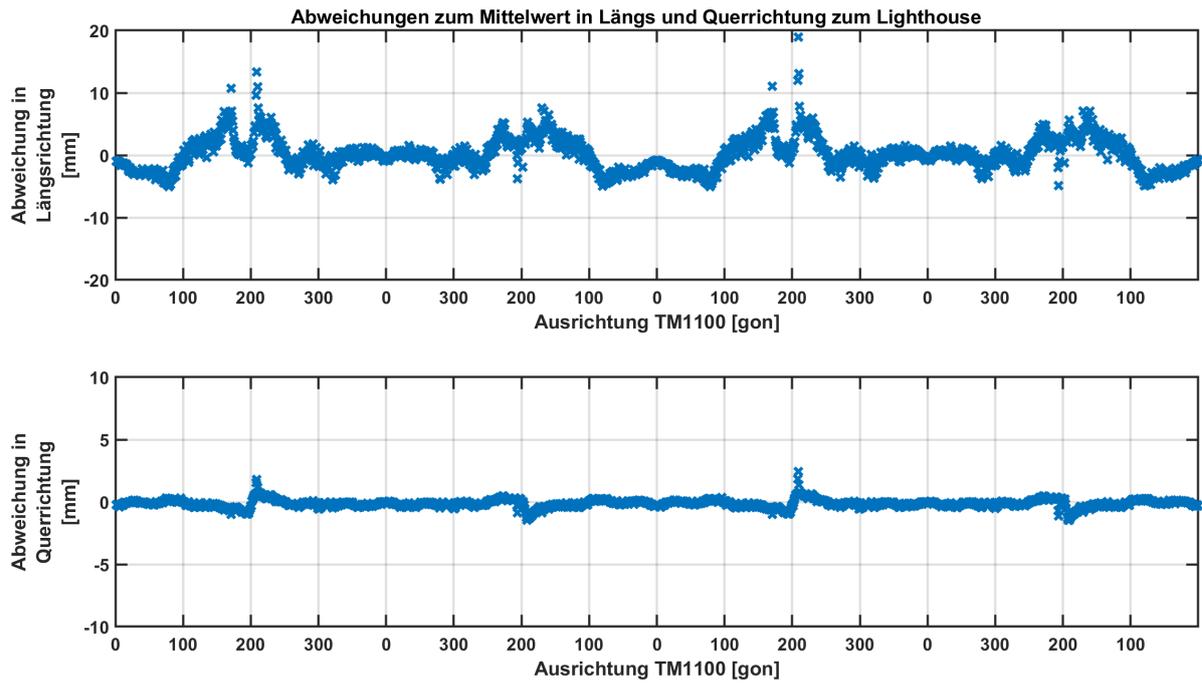


Abbildung 4.61: Abweichungen zum Mittelwert in Längs- und Querrichtung zum Lighthouse

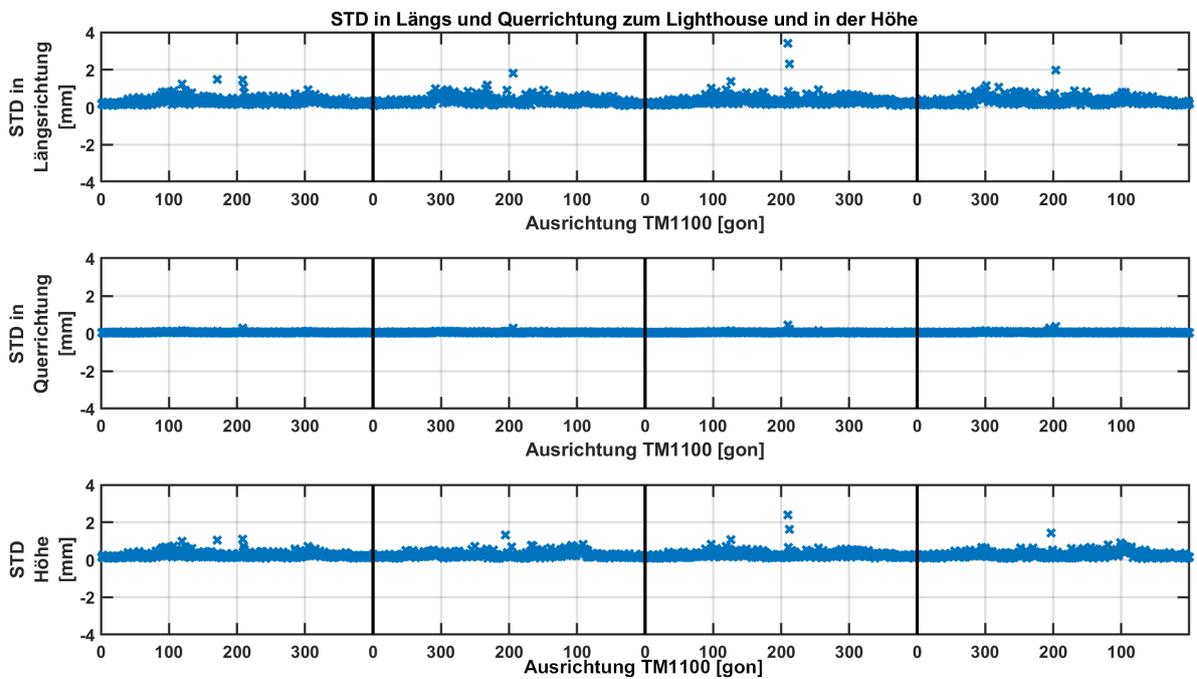


Abbildung 4.62: Standardabweichung der Messungen in Längs- und Querrichtung sowie der Höhe

Bei der Untersuchung des HMD hat sich somit bestätigt, dass die Anzahl der sichtbaren Dioden einen starken Einfluss auf die Qualität der Messungen hat. Der optimale Bereich der Ausrichtung der Brille auf das Lighthouse konnte mit ± 80 gon bestimmt werden. Durch den geänderten Versuchsablauf mit der geänderten Rotationsrichtung konnte auch bestätigt werden, dass die zurückgelegte Trajektorie einen Einfluss auf die Positionsbestimmung hat.

4.3.5.7 Rotationstest Vergleich der Komponenten

In Abbildung 4.63 sind Abweichungsprofile von HMD, Controller und Tracker gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die Spannweite der Abweichung der Brille deutlich größer ist als die von Tracker und Controller. Da es nicht möglich war, die Versuchsaufbauten ident zu gestalten, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die unterschiedlichen Spannweiten durch den Versuchsaufbau (Winkel vom Lighthouse, Höhendifferenz, Abschattung, usw.) bedingt sind. In dieser Abbildung wird auch ersichtlich, dass sich die Kurven der unterschiedlichen Komponenten stark unterscheiden. Dies bestätigt die Vermutung, dass die Abweichungen durch die Lage und Sichtbarkeit der Dioden beeinflusst wird, welche bei den Komponenten sehr unterschiedlich angebracht sind.

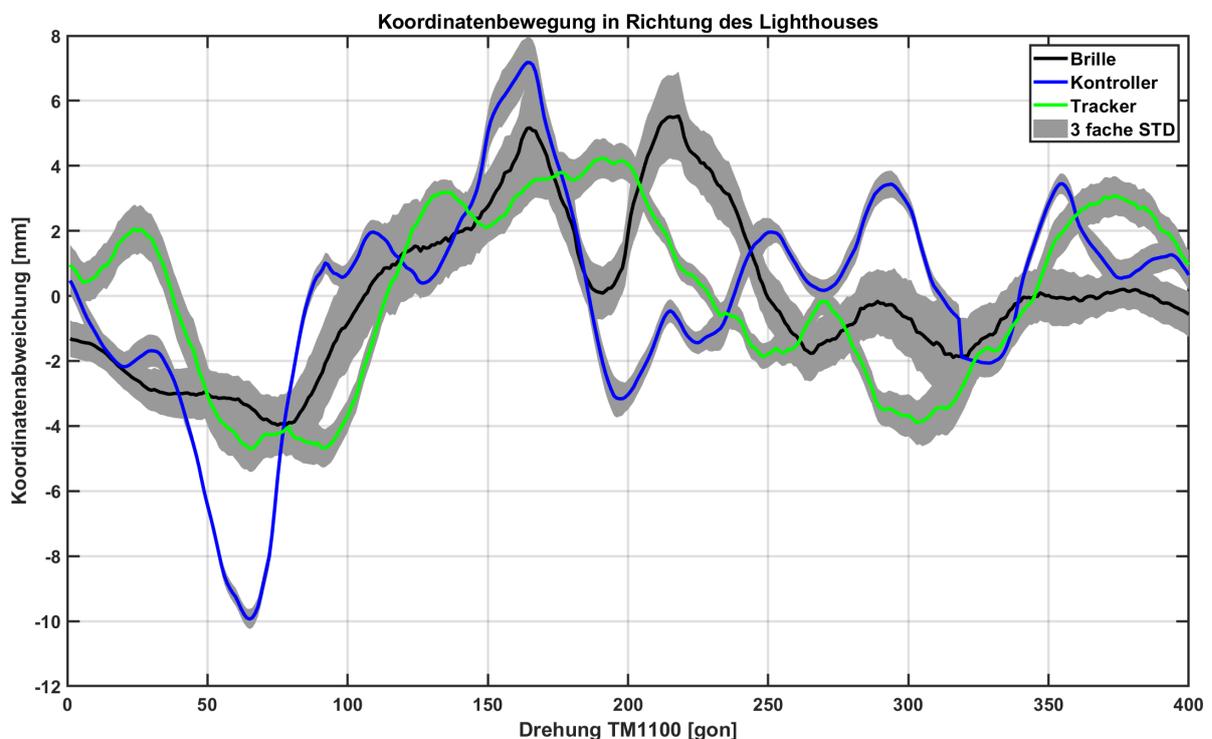


Abbildung 4.63: Vergleich der Rotationsabweichungen von HMD, Controller und Tracker

4.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Untersuchung der Koordinatenmessung

In dem vorangegangenen Abschnitt wurde die Positionsbestimmung komponentenweise untersucht. Kombiniert man alle Erkenntnisse, kann Folgendes festgehalten werden:

Das Messrauschen der VR-Komponenten ist in den meisten Fällen elliptisch und auf ein Lighthouse ausgerichtet. Unter gewissen Konfigurationen der Lighthouses zueinander und der richtigen Position des Devices zu den Lighthouses ist auch ein nahezu isotropes Rauschmuster möglich. Wie in Abbildung 4.14 zu sehen ist, ist hier aber keine Systematik erkennbar, wann beide Lighthouses zur Positionsbestimmung verwendet werden. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde anschließend das Messrauschen unter Verwendung von nur einem Lighthouse untersucht. Die Größenordnung

der Abweichungen hängt von der Distanz zum Lighthouse (Abschnitt 4.3.4), der Art des Devices (Abschnitt 4.3.1.4) und der Ausrichtung des Lighthouses zum Device ab (Abschnitt 4.3.2.1). Die Abweichungen in Querrichtung sind um den Faktor 5 bis 10 (je nach Ausrichtung des Lighthouses) kleiner als jene in Längsrichtung (Tabelle 4.3). Diese Ergebnisse bestätigen die theoretische Annahme, dass die Distanzmessung mit einer größeren Unsicherheit belastet ist als die Richtungsmessung. Neben der Untersuchung des Messrauschens wurde auch der Messbereich des Systems untersucht. In den Konfigurationsdateien⁴ der Lighthouses sind für den Messbereich Grenzwerte von 0,5 m bis 6 m angegeben. Die Untersuchungen in Abschnitt 4.3.2 haben diese Werte teilweise bestätigt. Die Tatsache, dass es bei den Versuchen in Abschnitt 4.3.2.3 ab dem zweiten Zyklus bzw. beim Tracker TU ab dem ersten Zyklus funktioniert hat, lässt die Vermutung zu, dass ein Abstand von 0,45 m sehr nahe an der Grenze des Messbereichs liegt und bestätigt somit den von HTC definierten Grenzwert. Der Maximalabstand mit 6 m konnte in den Untersuchungen überschritten werden. Es war bis zu einem Abstand von 7,4 m möglich, Messungen durchzuführen. Die Abweichungen zum Referenzwert sowie die Standardabweichung steigen jedoch ab 7 m stark an.

Aus den Messungen in Abschnitt 4.3.4 lässt sich auch ein Maßstab des Systems ableiten. Eine eindeutige Bestimmung des Systemmaßstabs war nicht möglich (Abbildung 4.33).

Ein weiterer systematischer Effekt, der untersucht wurde, sind die Abweichungen, welche von der Ausrichtung des Devices auf das Lighthouse abhängig sind. Beim Tracker wurde das Koordinatenzentrum überprüft und die Abweichungen betragen weniger als 1 mm (Abschnitt 4.3.5.3). Aus diesem Grund sollten die Abweichungen bei Rotation um eine der Koordinatenachsen nicht größer als das Messrauschen sein. Wie sich in Abbildung 4.35a gezeigt hat, treten trotz dieser Annahme systematische Abweichungen auf, welche im Rahmen der Messgenauigkeit wiederholbar sind (Abbildung 4.39). Die Form und Ausrichtung der Abweichungen gleichen denen des Messrauschens und ist eindeutig auf ein Lighthouse ausgerichtet. Die Spannweite der Abweichungen der einzelnen Komponenten liegt bei dem durchgeführten Versuch zwischen 8 mm (Tracker) und 18 mm (Controller). Auffällig ist, dass die Grundcharakteristik der Abweichung bei den drei getesteten Trackern ähnlich ist (Abbildung 4.41). Für die stärkere Abweichung des Trackers TU konnte in Abschnitt 4.3.5.2 gezeigt werden, dass es sich um eine defekte Diode handeln könnte. Da die Verwendung von zwei Lighthouses in Bezug auf das Messrauschen in gewissen Konfigurationen Verbesserungen bewirkt hat, wurden auch die Rotationsabweichungen mit zwei Lighthouses untersucht (Abschnitt 4.3.5.4). Hierbei ist herausgekommen, dass sich das Messrauschen zwar verbessert (Abbildung 4.49), aber das zweite Lighthouse auf die rotationsabhängigen Abweichungen keinen Einfluss hat. Diese sind, wie auch beim Versuch mit einem Lighthouse, auf dieses ausgerichtet und in der gleichen Größenordnung. Da nicht bekannt ist, wie die Positionsberechnung abläuft, kann nicht bestimmt werden, wie es zu diesem Ergebnis kommt. Es ist jedoch klar, dass die Berechnung, anders als in geodätischen Anwendungen üblich, nicht auf einem Gauß-Markov-Modell basiert [Niemeier, 2008]. Bei der Rotationsüberprüfung des HMD ist aufgefallen, dass dieses einen optimalen Messbereich hat. Dieser bestimmt sich durch die Ausrichtung der Brille zum Lighthouse und kann mit einer Breite von ± 80 gon angegeben werden. Als Grund hierfür kann die Bauform und die Verteilung der Dioden genannt werden, da diese im Unterschied zu Tracker und Controller nicht auf eine 360°-Benutzung ausgelegt sind. Als weiterer Systemeinfluss wurde der Einfluss der zurückgelegten Trajektorie auf die Positionsbestimmung aufgedeckt. Dies kann in den Ergebnissen der Maßstabsbestimmung (Abschnitt 4.3.4) und auch bei der Rotation der Brille beobachtet werden.

⁴Export über SteamVR - Option: Systembericht erstellen

4.4 Untersuchung des Verhaltens der Orientierungsmessung der Devices

Wie bereits im Abschnitt 3 beschrieben, handelt es sich bei dem HTC Vive Pro System um ein VR-System mit sechs Degrees of Freedom (DoF). Da in vielen Anwendungsfällen auch die Ausrichtung des Devices eine Rolle spielt, wurde auch die Genauigkeit des Systems in Bezug auf diese untersucht. Die folgenden Ergebnisse leiten sich von den Rotationstests aus Abschnitt 4.3.5 ab. Auf eine Untersuchung des HMD wurde verzichtet, da dieses nicht reproduzierbar am Adapter befestigt werden konnte.

4.4.1 Orientierung Controller

In Abbildung 4.64 sind die ausgelesenen Werte der Orientierung des Controllers K1 während der dreimaligen Drehung um die Vertikalachse dargestellt. Im Gegensatz zu den Daten des Koordinatenzentrums wurde keine Korrektur bezüglich des verschobenen Koordinatenzentrums angebracht, da dieses die relative Änderung der Ausrichtung nicht beeinflusst. Es ist deutlich zu sehen, dass die Rotation um die Y-Achse erfolgt, was mit der Definition des Koordinatensystems zusammenpasst. Die Anomalien in der Z-Achse entstehen durch das Mitteln der 20 Messungen an einer Position. Dies liegt daran, dass während der Messung die Werte zwischen >400 gon und >0 gon springen. Diese Sprünge bilden sich auch in der Standardabweichung in Abbildung 4.65 ab, sind aber rein rechnerisch bedingt. In der Abbildung 4.65 sind neben der Standardabweichung die Differenzen zur ersten Umdrehung dargestellt. Es ist ersichtlich, dass bis auf die genannten Abweichungen in der Z-Achse die Abweichungen sowie die Standardabweichung immer im Bereich von ± 0.2 gon liegen. Die Abbildung 4.66 zeigt die Differenz der vom Controller gemessenen Orientierung zur Ausrichtung, welche mittels TM1100 bestimmt wurde. Beide Datenreihen beziehen sich auf den ersten gemessenen Wert. In dieser Abbildung ist deutlich eine systematische Abweichung zu erkennen. Die sich wiederholenden Spitzen sind vermutlich, wie auch bei den Abweichungen der Koordinaten zuvor, durch die Konfiguration und Sichtbarkeit der Dioden bedingt. Die Spannweite der Daten liegt hier zwischen $-1,0$ und $+1,4$ gon.

Eine übliche Anwendung für den Controller in vielen Spielen und Applikationen ist das Auswählen eines Buttons mittels Laserstrahl. Ist der Button 2 m entfernt, entspricht die Abweichung von 1 gon ca. 30 mm. In den meisten Applikationen ist dieser Einfluss somit vernachlässigbar.

Dieser Versuch wurde auch mit dem Controller K2 durchgeführt. Die Spannweite der Abweichungen sowie die Wiederholbarkeit der Rotationen wurden durch diese Messungen bestätigt.

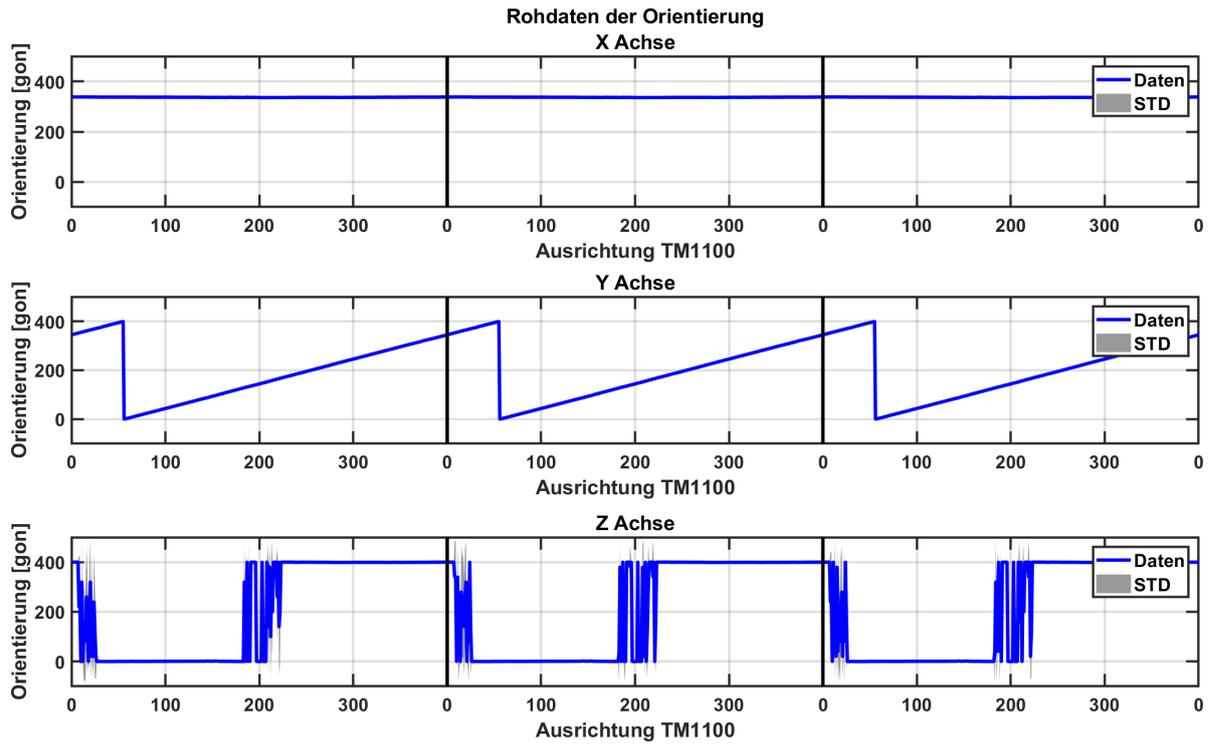


Abbildung 4.64: Rohdaten der Orientierung des Controllers K1 bei Rotation

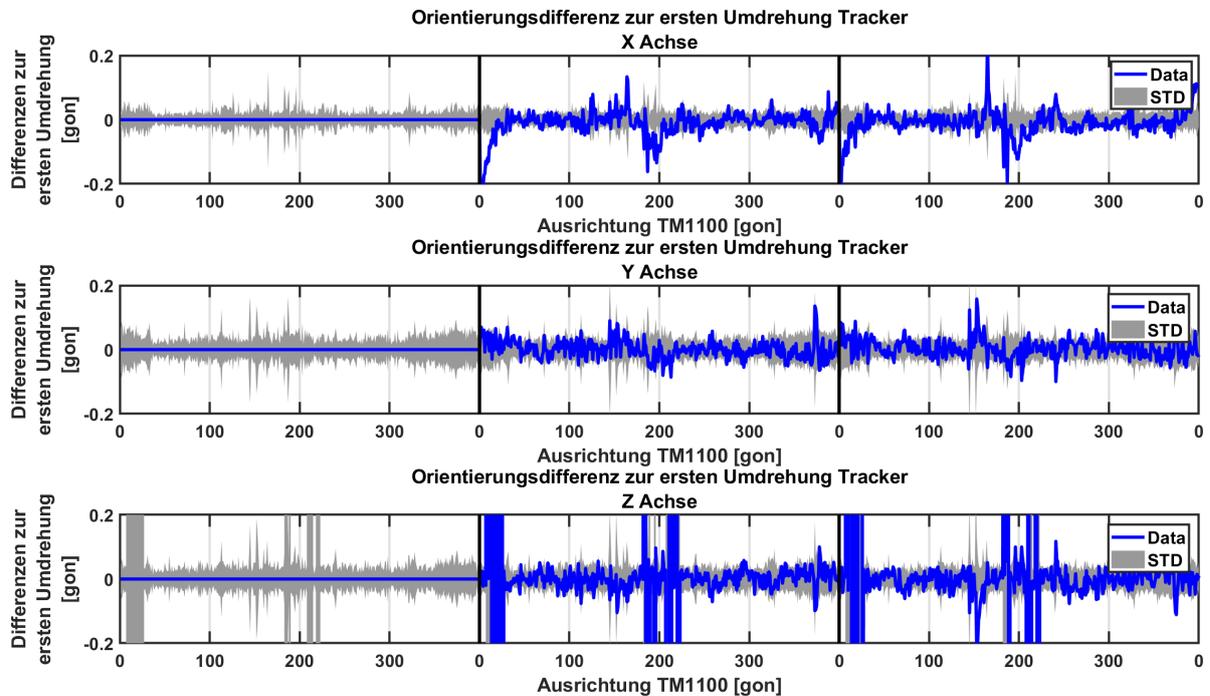


Abbildung 4.65: Wiederholbarkeit der Orientierung des Controllers K1 bei Rotation

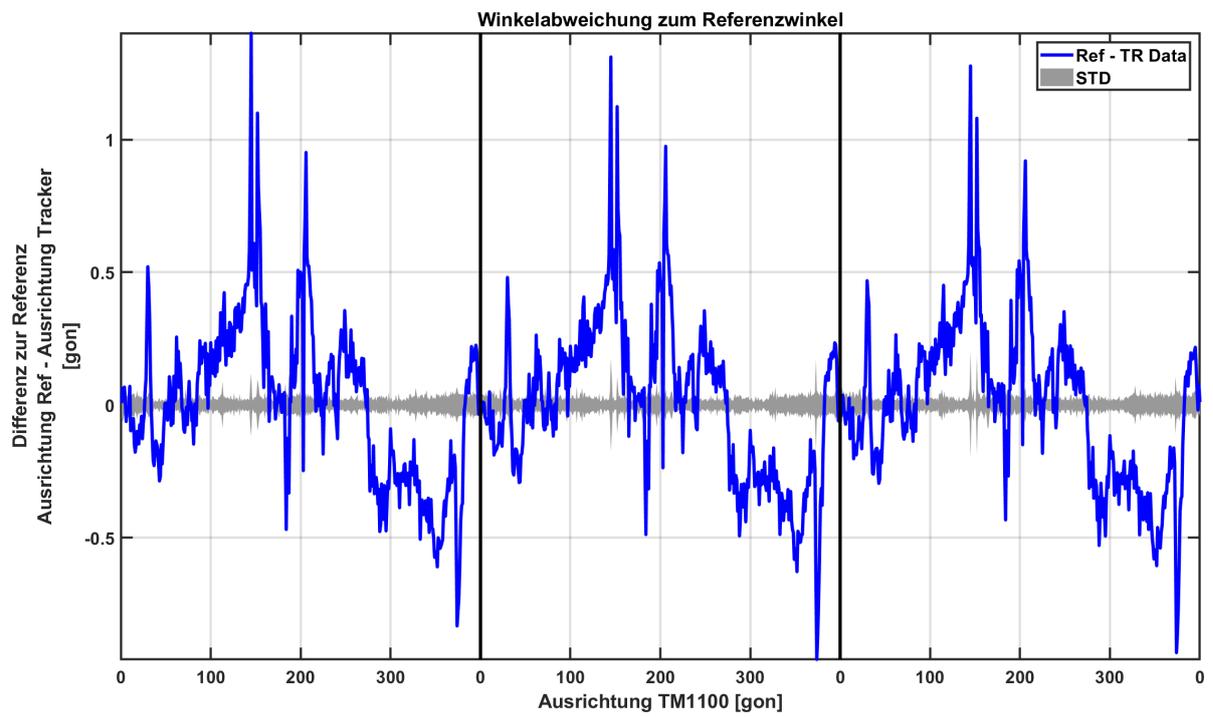


Abbildung 4.66: Differenz zur Referenz der Orientierung des Controllers K1 bei Rotation

4.4.2 Orientierung Tracker

Für den Tracker wurde dieselbe Untersuchung wie für den Controller durchgeführt. Auch hier stammen die Daten aus dem in Abschnitt 4.3.5.1 beschriebenen Versuchsaufbau. Bei der Untersuchung des Trackers wurden im Gegensatz zu des Controllers einige Auffälligkeiten beobachtet.

In den Abbildungen 4.67 und 4.68 sind jeweils die Rohdaten von zwei Rotationsversuchen dargestellt. Vergleicht man die beiden Abbildungen, fällt auf den ersten Blick auf, dass es Unterschiede in den Daten der Rotationsachse gibt. Im Fall 1 (Abbildung 4.67) verhält sich der Tracker wie der zuvor beschriebene Controller. In Fall 2 (Abbildung 4.68) scheint sich das Koordinatensystem verdreht zu haben, da die Rotation in der Z- und minimal auch in der Y-Achse ersichtlich ist. Die Befestigung und Ausrichtung des Trackers waren aber in beiden Fällen gleich.

Betrachtet man die Differenzen zur ersten Umdrehung in Fall 1 (Abbildung 4.69), sind diese in einer vergleichbaren Größenordnung wie zuvor beim Controller.

Die Ergebnisse in Abbildung 4.70, in welcher die Differenzen zur Referenz dargestellt sind, zeigen sogar, dass im Vergleich zu den Werten des Controllers die Abweichungen beim Tracker mit einer Spannweite von 0,51 gon um den Faktor drei geringer sind. Außerdem ist eine Abweichungsstruktur mit drei Spitzen pro Umdrehung deutlich erkennbar. Die Ursache liegt vermutlich an der Form des Trackers. Die Struktur und Diodenverteilung wiederholt sich, wie in in den Abbildungen 3.4 und 3.5 im Kapitel 3 ersichtlich ist, pro Umdrehung drei Mal.

Im Fall 1 ist somit der Tracker mit den Kennwerten des Controllers vergleichbar.

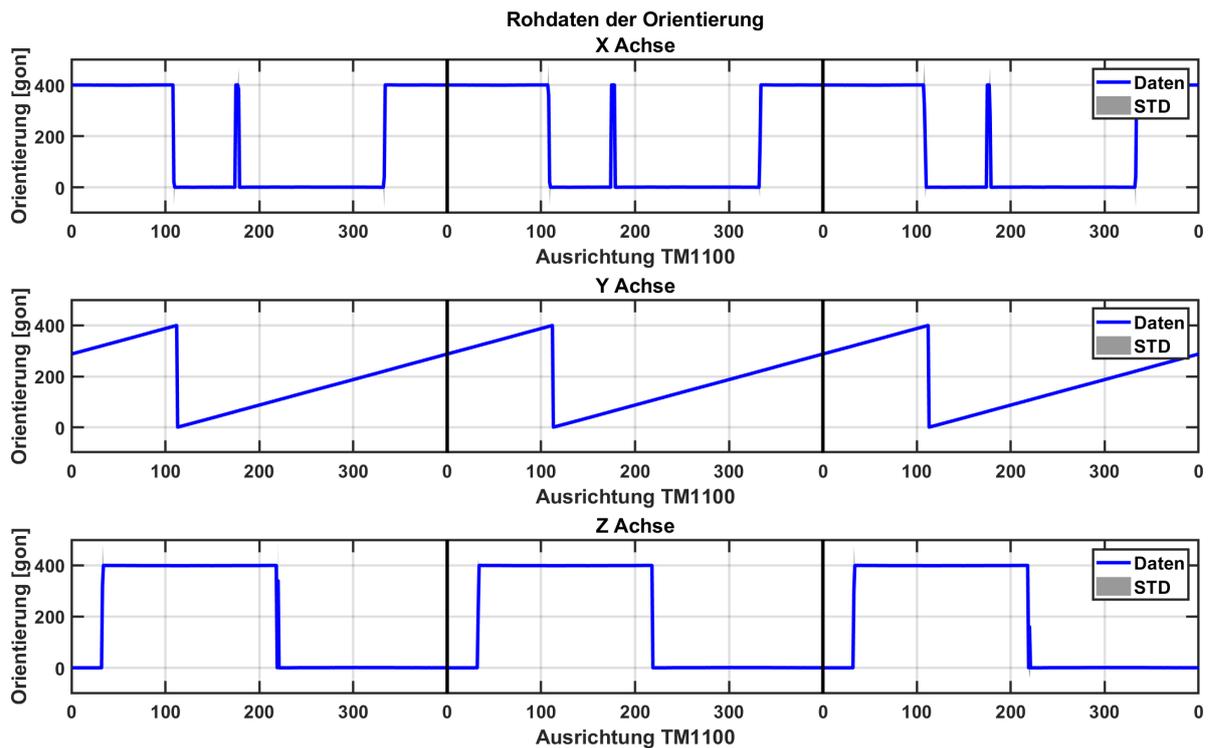


Abbildung 4.67: Rohdaten der Orientierung des Trackers M1 bei Rotation - Fall 1

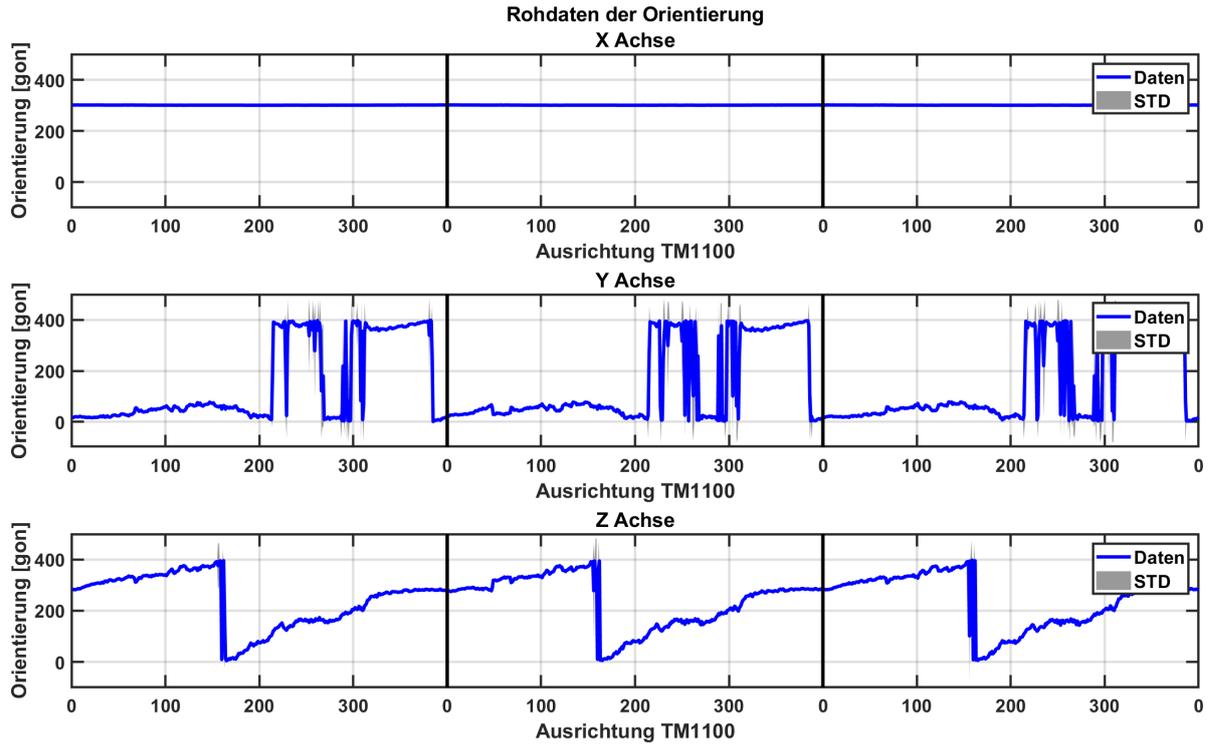


Abbildung 4.68: Rohdaten der Orientierung des Trackers M1 bei Rotation - Fall 2

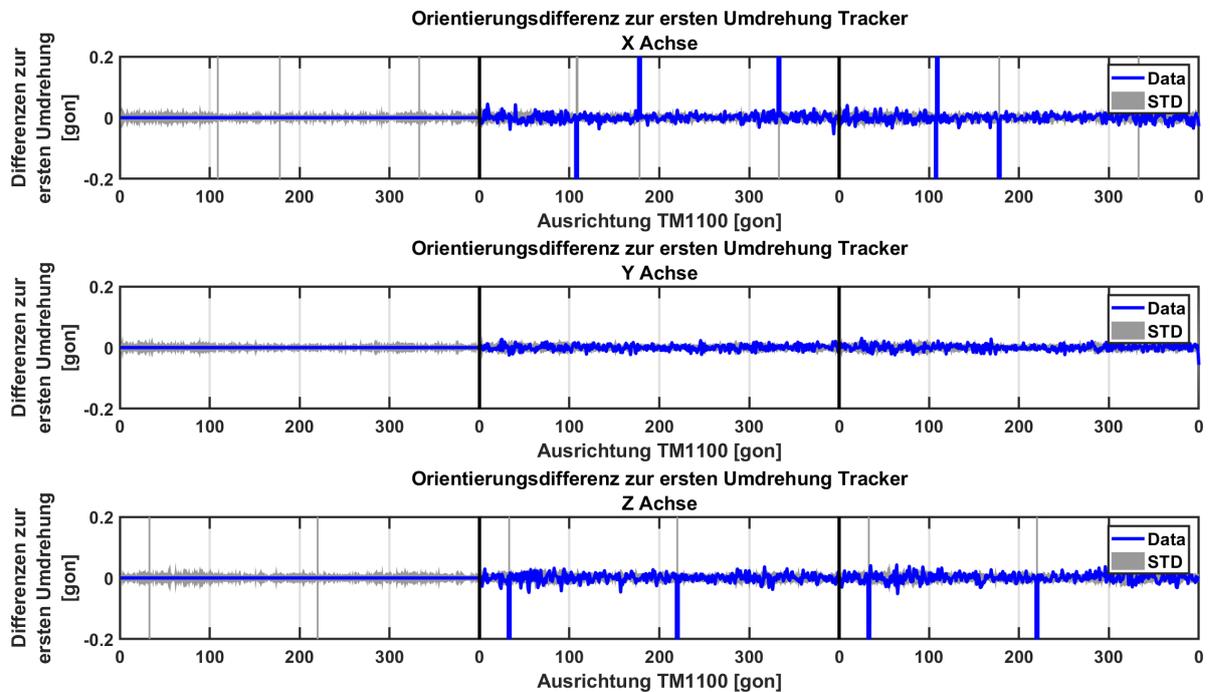


Abbildung 4.69: Wiederholbarkeit der Orientierung des Trackers M1 bei Rotation - Fall 1

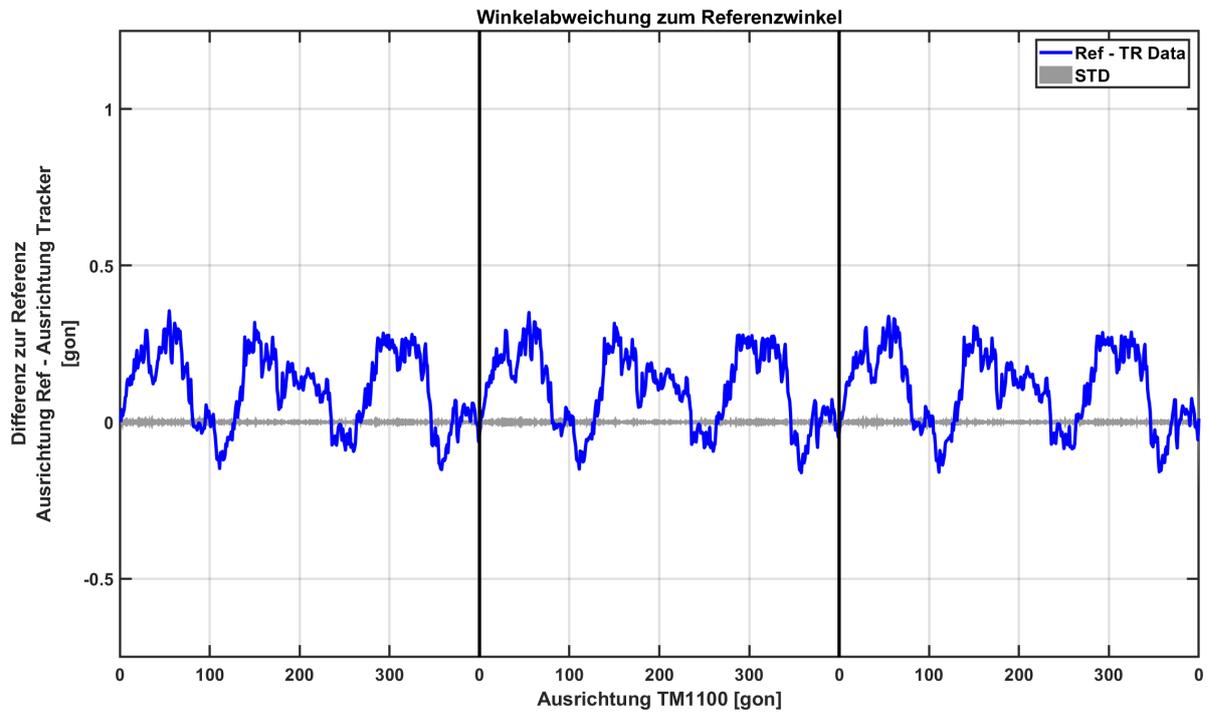


Abbildung 4.70: Differenz zur Referenz des Trackers M1 bei Rotation - Fall 1

Vergleicht man die Grafiken für den Fall 1 (Abbildung 4.70) mit denen des Falls 2 (Abbildung 4.72), ist auf die unterschiedliche Skalierung zu achten. Im Fall 2 zeigt der Tracker deutlich größere Abweichungen. Die Abweichungen zwischen den Rotationen betragen teilweise über 20 gon und sind nicht stabil. Die Abweichungen zur Referenz, welche in diesem Fall aus den Daten der Z-Achse berechnet wurden, weisen Abweichungen mit einer Spannweite von 100 gon auf. Im Unterschied zu Fall 1 zeigt sich auch kein Abweichungsverlauf, der mit der Bauform erklärbar wäre. Da sich in Abbildung 4.68 aber zeigt, dass die Rotation sich auf zwei Achsen aufteilt, ist die Berechnung der Referenz rein zur Z-Achse nicht aussagekräftig. Weil aber die Systematik der Verdrehung des Koordinatensystems nicht erkennbar ist, und auch die Abweichungen zwischen den Rotationen auf den einzelnen Achsen deutlich schlechter sind, ist davon auszugehen, dass es hier zu einem Fehlverhalten des Positionierungssystems kommt.

Die Messungen in diesem Abschnitt wurden mit der Softwareversion 1.3.6 von SteamVR und Unity 2018.3.0f2 + SteamVR Plugin 1.2.3 durchgeführt. Bei weiteren Versuchen auf einem anderen PC mit der SteamVR-Version 1.9.5, Unity 3.0.f.2 + SteamVR-Plugin v.2.3.2, konnte der Fall 1 nicht mehr reproduziert werden und der Tracker bleibt durchgehend im Standardfall 2.

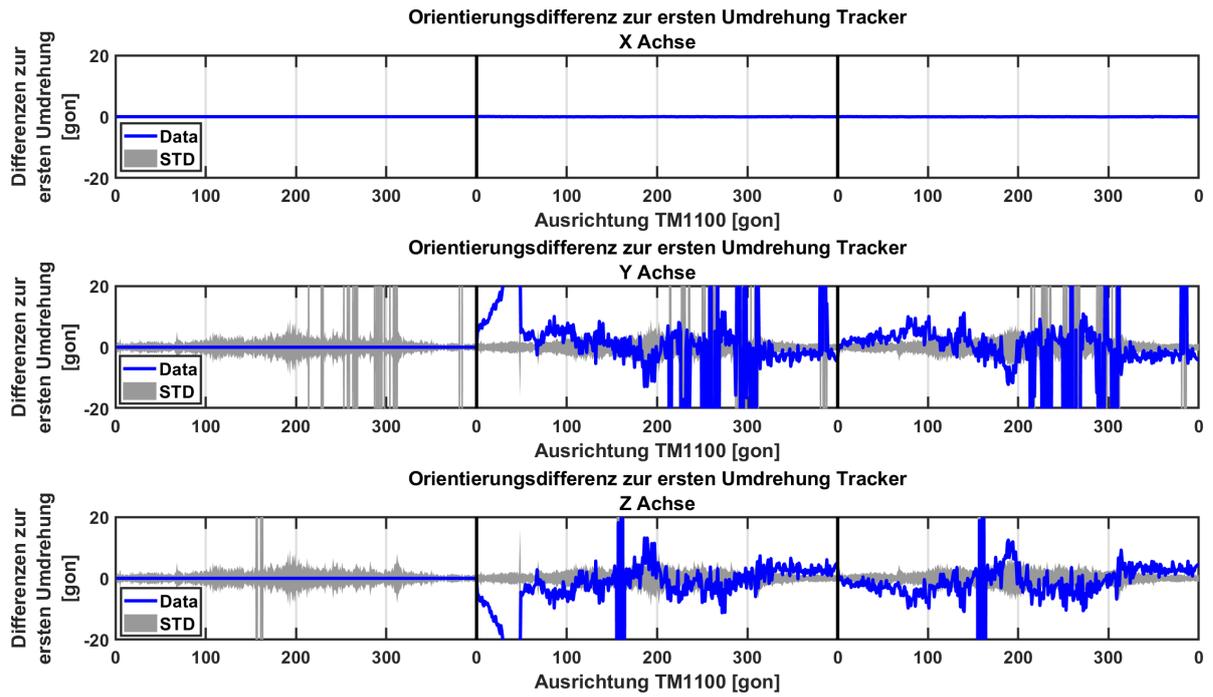


Abbildung 4.71: Wiederholbarkeit der Orientierung des Trackers M1 bei Rotation - Fall 2

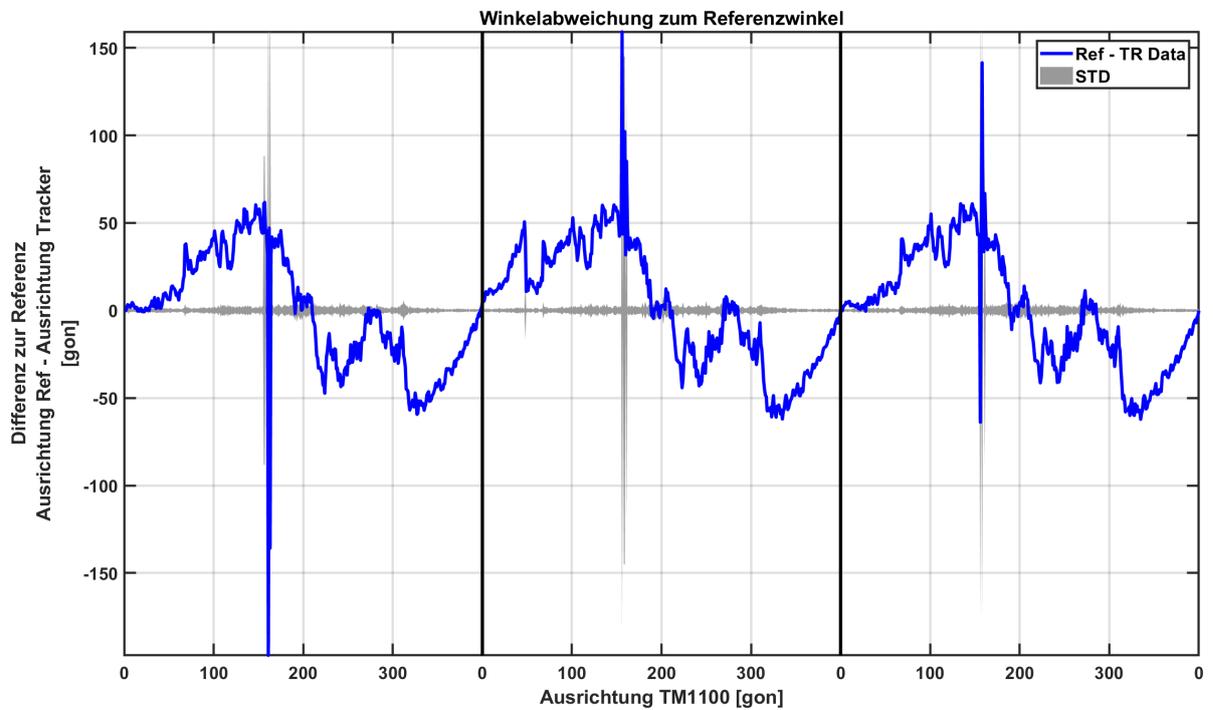


Abbildung 4.72: Differenz zur Referenz des Trackers M1 bei Rotation - Fall 2

4.5 Devicebezogene Auffälligkeiten des Trackers

Neben dem in Abschnitt 4.4.2 aufgezeigten Fehlverhalten der Orientierungsbestimmung des Trackers wurde auch bei den Untersuchungen des Messbereichs bzw. des Maßstabs (Abschnitt 4.3.2) ein sprunghaftes Verhalten der Koordinatenbestimmung erkannt. Im folgenden Abschnitt wird genauer auf diese Auffälligkeiten eingegangen.

4.5.1 Orientierungssprung des Trackers

Nach der Erkenntnis aus Abschnitt 4.4.2, dass es offensichtlich bei den Messungen des Trackers zwei unterschiedliche Varianten der Orientierungsbestimmung gibt, wurden die vorhandenen Daten aller aufgezeichneten Rotationsversuche nach Auffälligkeiten untersucht. In Abbildung 4.73 ist eine Datenreihe dargestellt, in welcher sich das Verhalten der aufgezeichneten Orientierungswerte sprunghaft ändert. Die Daten zeigen während des zweiten Rotationszyklus einen Wechsel vom zuvor beschriebenen Fall 2 auf den Fall 1. Aufgrund der in Abschnitt 4.2.4.2 erläuterten Instabilität der Devicestreams wurden bei den meisten Versuchen alle VR-Komponenten (HMD, 2x Controller und Tracker) eingeschaltet und aufgezeichnet. Deshalb konnte bei der Ursachenermittlung auf diese Daten zurückgegriffen werden. Bei der Untersuchung der zur Abbildung 4.73 gehörenden Controllerdaten fiel auf, dass der Controller 2 zum Zeitpunkt des Sprungs ausgefallen ist. Folglich könnte dieser Ausfall der Auslöser des Sprungs sein. Da es sich bei dem Sprung um die gemessene Orientierung des Trackers handelt, stellte sich auch die Frage, ob dieser Sprung an dem virtuellen Trackerobjekt sichtbar ist.

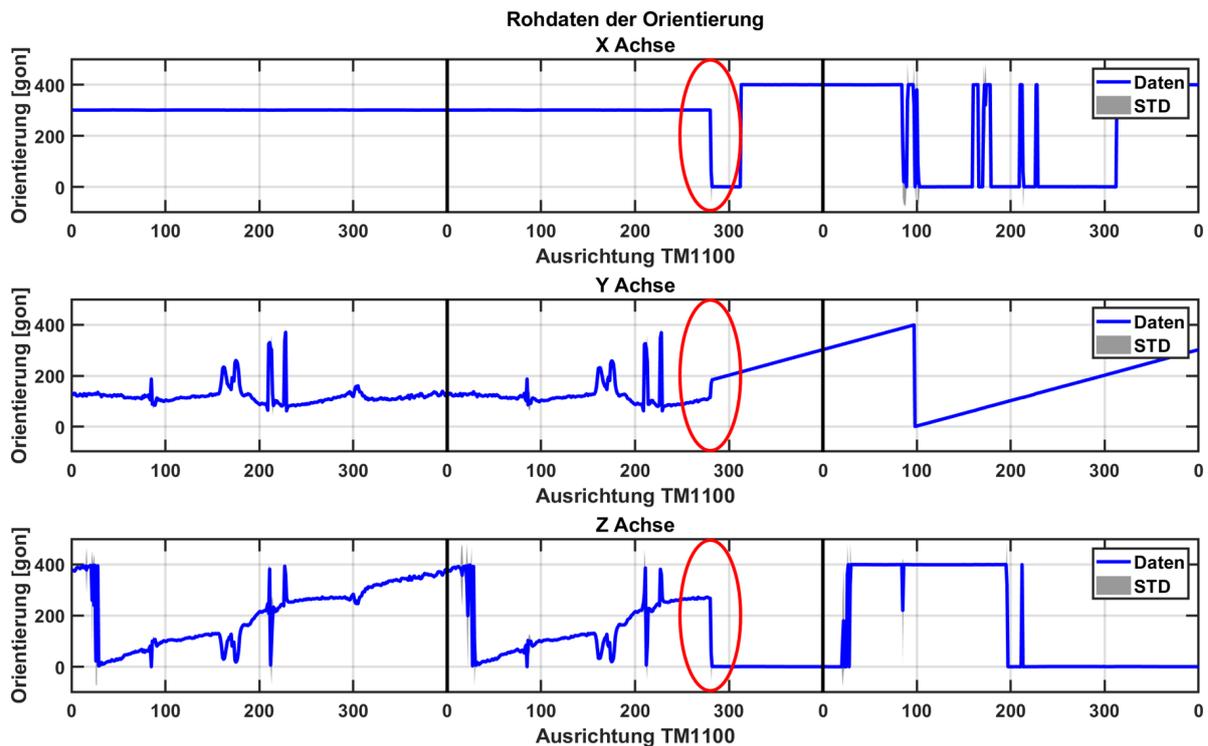


Abbildung 4.73: Rohdaten der Orientierung des Trackers M1 bei Rotation - Wechsel zwischen Fall 2 und Fall 1

Um diese Hypothese zu bestätigen, wurde versucht, einen Sprung geplant herbeizuführen. Dazu wurde der Tracker mit den vorhandenen Aufbauten stabilisiert. Beim Start des VR-Systems wurden zusätzlich zum HMD und dem Tracker auch die beiden Controller eingeschaltet und die Aufzeichnung für alle Komponenten mittels der Variante Dauermessung - PC gestartet. Nach 4200 bzw. 5590 Messungen wurden die Controller abgeschaltet. Um die Darstellung des Trackers in der virtuellen Umgebung zu dokumentieren, wurde der Videostream während dem Versuch aufgezeichnet.

Wie in Abbildung 4.74 zu sehen ist, war es möglich, durch das Abschalten beider Controller einen Sprung in der Orientierung des Trackers zu reproduzieren. Auffällig ist hierbei, dass erst das Ausschalten des zweiten Controllers den Sprung bewirkt. Wie auch schon in den Versuchen aus Abschnitt 4.4.2 unterscheiden sich die Standardabweichungen von Y- und Z-Achse der beiden Phasen deutlich. Diese Veränderung der gemessenen Orientierung des Trackers ist auch in den Koordinaten des Trackers (Abbildung 4.75) ersichtlich. Bei den Koordinaten zeigt sich der Sprung in der Höhenkomponente. Im Unterschied zu den Orientierungen kommt es hierbei bei keiner der Achsen zu einer Veränderung der Standardabweichung. Nach der Kontrolle der Daten der restlichen Devices kann ausgeschlossen werden, dass es sich um einen Sprung des gesamten Koordinatensystems handelt. Bei der Analyse der Videos, welche während des Versuchs gemacht wurden, war zu erkennen, dass sich die Darstellung des Trackers in Unity verändert hat. Die drei Zustände werden in Abbildung 4.76 dargestellt. Es sind jeweils die Darstellungen der aktiven Controller aus der Unity VR sowie die Statusanzeige des SteamVR-Systems gegenübergestellt. Vor dem Abschalten des zweiten Controllers wird der Tracker mit der Grundplatte nach unten dargestellt (Abbildungen 4.76a und 4.76b). Dies entspricht seiner Lage in der realen Welt. Nach dem Koordinaten- und Orientierungssprung ändert sich die Ausrichtung des Trackers in der virtuellen Umgebung um 90° (Abbildung 4.76c). In diesem Zusammenhang fällt auf, dass die Phase 2 der Messung jene mit der deutlich geringeren Standardabweichung in der Orientierung ist (Abbildung 4.74). Betrachtet man aber das dargestellte Bild des Trackers in Abbildung 4.76c, ist diese Phase jene, in welcher der Tracker falsch dargestellt wird. Der Versuch wurde mit den zur Verfügung stehenden Trackern durchgeführt und war mit allen reproduzierbar. Eine Abhängigkeit zwischen einem der beiden Controller und dem Sprungverhalten konnte nicht festgestellt werden. Außerdem wurde der Sprung teilweise auch beim Abschalten bzw. bei einem Ausfall des ersten Controllers ausgelöst, wie es auch bei dem Rotationstest in Abbildung 4.73 der Fall war.

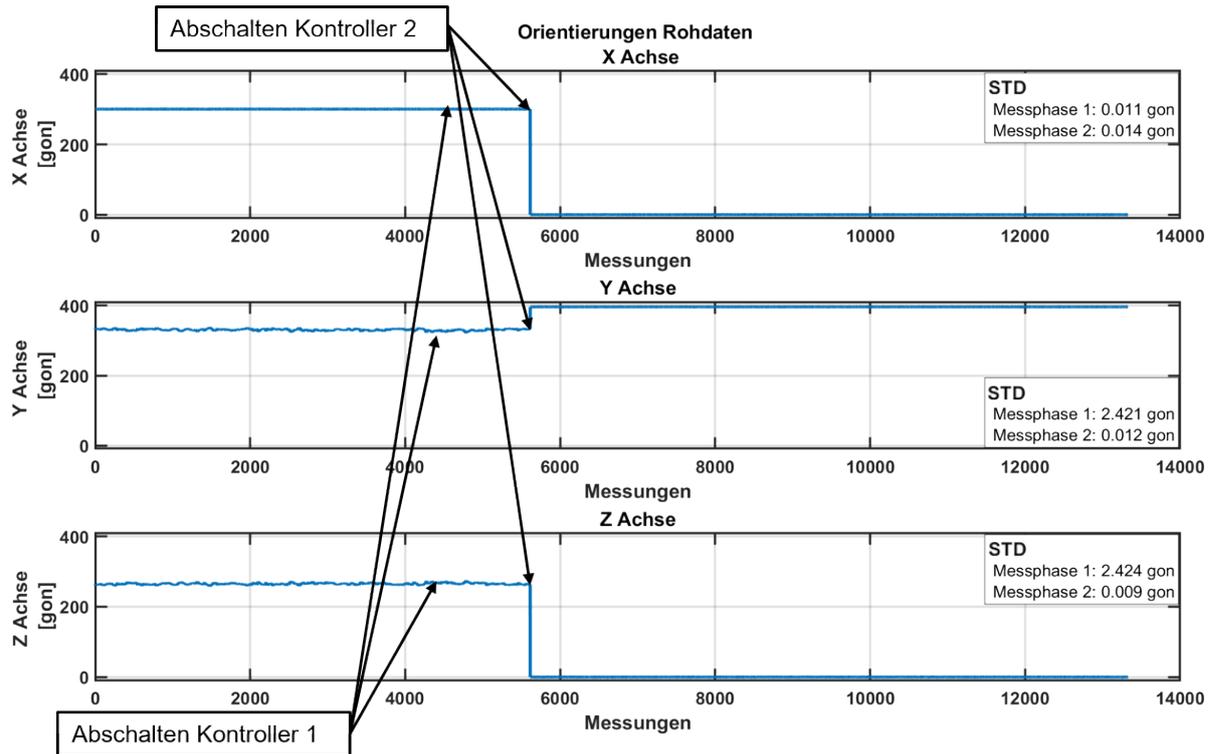


Abbildung 4.74: Rohdaten der Orientierung des Trackers M1 in Ruhelage - erzwungener Ausrichtungssprung

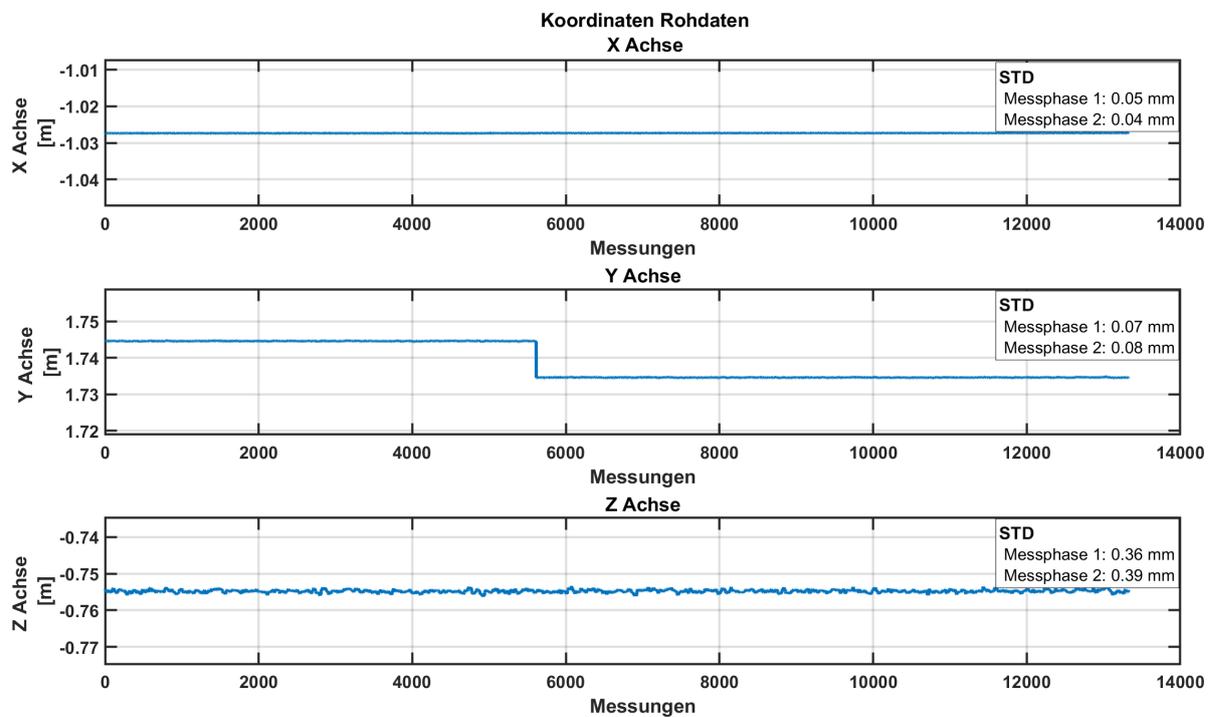


Abbildung 4.75: Rohdaten der Koordinaten des Trackers M1 in Ruhelage - erzwungener Orientierungssprung



(a) Zeitpunkt 2000: 2 Controller aktiv und Tracker in korrekter Darstellung



(b) Zeitpunkt 5400: 1 Controller aktiv, 1 Controller deaktiviert und Tracker in korrekter Darstellung



(c) Zeitpunkt 6700: 2 Controller deaktiviert und Tracker verkippt

**Abbildung 4.76:** Darstellung des Trackers in Unity inkl. Statusanzeige von SteamVR

Zusammenfassend kann somit gesagt werden, dass die Ursache dieser Art des Orientierungs- und Koordinatensprungs mit dem Abschalten bzw. einem Ausfall der Controller zusammenhängt. Der Orientierungssprung ist auch in der Darstellung des Trackers in Unity zu sehen. In der Situation 1, in welcher der Tracker falsch dargestellt wird, sind die Standardabweichungen der Orientierung deutlich geringer und die Orientierungswerte passen viel besser zur Referenz.

4.5.2 Koordinatensprünge des Trackers

Eine zweite, bis jetzt nicht näher untersuchte Auffälligkeit des Trackers, wurde bei den Messbereichs- bzw. Maßstabsuntersuchungen in Abschnitt 4.3.2.3 entdeckt. Wie aus Abbildung 4.77 ersichtlich wird, kam es bei den Koordinaten des Trackers zu einem deutlichen Sprung von ca. 20 mm. Nach der Betrachtung der Daten des zweiten Trackers, welcher fix auf einem Pfeiler installiert war, kann auch in diesem Fall ausgeschlossen werden, dass es sich um einen Sprung des gesamten Koordinatensystems handelt. Der Tracker 2 zeigt eine durchgehend konstante Position mit Standardabweichungen im Bereich 0,03 mm (Z-Achse) und 0,13 mm (X-Achse). Diese Werte passen zu den in Abschnitt 4.3.1.4 ermittelten Standardabweichungen bei statischer Messung. Die Ausrichtung des Messrauschens zeigt durchgehend auf das Lighthouse 1, wie es in dem Versuchsaufbau zu erwarten war. In der Abbildung 4.78 sind die Ausrichtungen des Messrauschens des bewegten Trackers 1 im Verhältnis zur Lage der Komponenten im Versuchsaufbau abgebildet. Es ist zu erkennen, dass ein Teil der Ellipsen auf das zweite Lighthouse ausgerichtet sind. Da es im Versuchsaufbau *Komparator Distanz 2* um die Bestimmung des Maßstabs in der Messung eines Lighthouses zu einem Device ging, wurden diese Daten für die weiteren Berechnungen in Abschnitt 4.3.2.3 nicht mehr verwendet. Betrachtet man die Abbildung 4.79, wird klar, dass dieser Wechsel des Bezugslichthouses durch einen Fehler im Versuchsaufbau ermöglicht wurde. Wie ersichtlich ist, wurde das Lighthouse 2 in einer sehr viel tieferen Position als der Tracker und nach unten hin geneigt auf die Brille ausgerichtet. Entgegen aller Annahmen war es für den Tracker offensichtlich möglich, die Daten des Lighthouses 2 zu empfangen. Daraus lässt sich ableiten, dass der Öffnungswinkel in vertikaler Richtung größer

ist als erwartet. Eine genauere Untersuchung des vertikalen Öffnungswinkels wurde jedoch nicht durchgeführt.

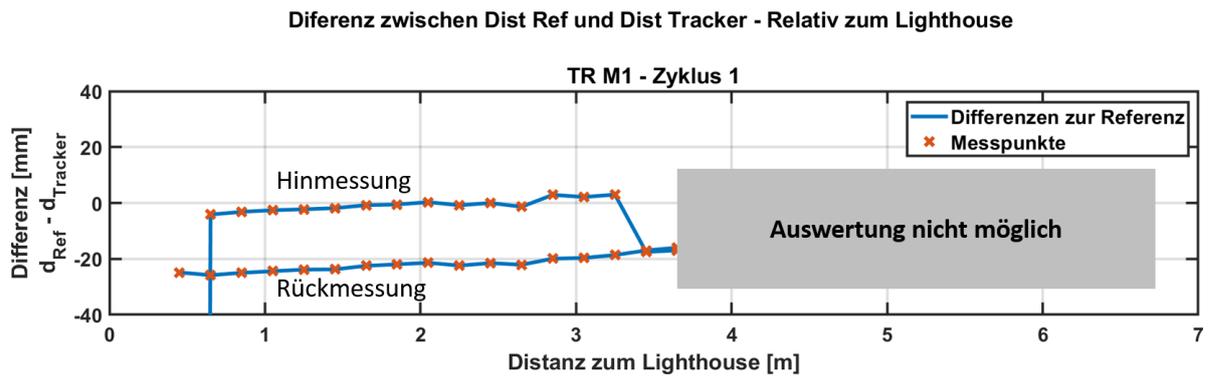


Abbildung 4.77: Koordinatensprung des Trackers M2 bei der Untersuchung des Messbereichs

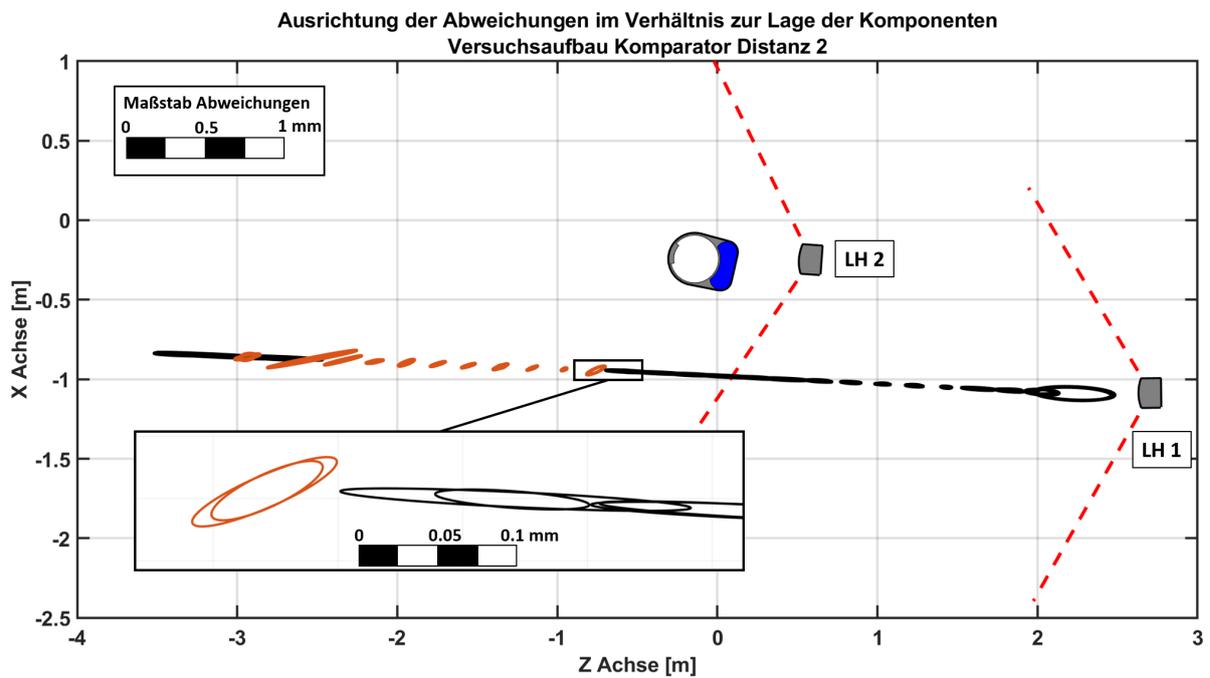


Abbildung 4.78: Ausrichtung der Abweichungen des Messrauschens am Verhältnis zur Lage der Komponenten im Versuchsaufbau Komparator Distanz 2

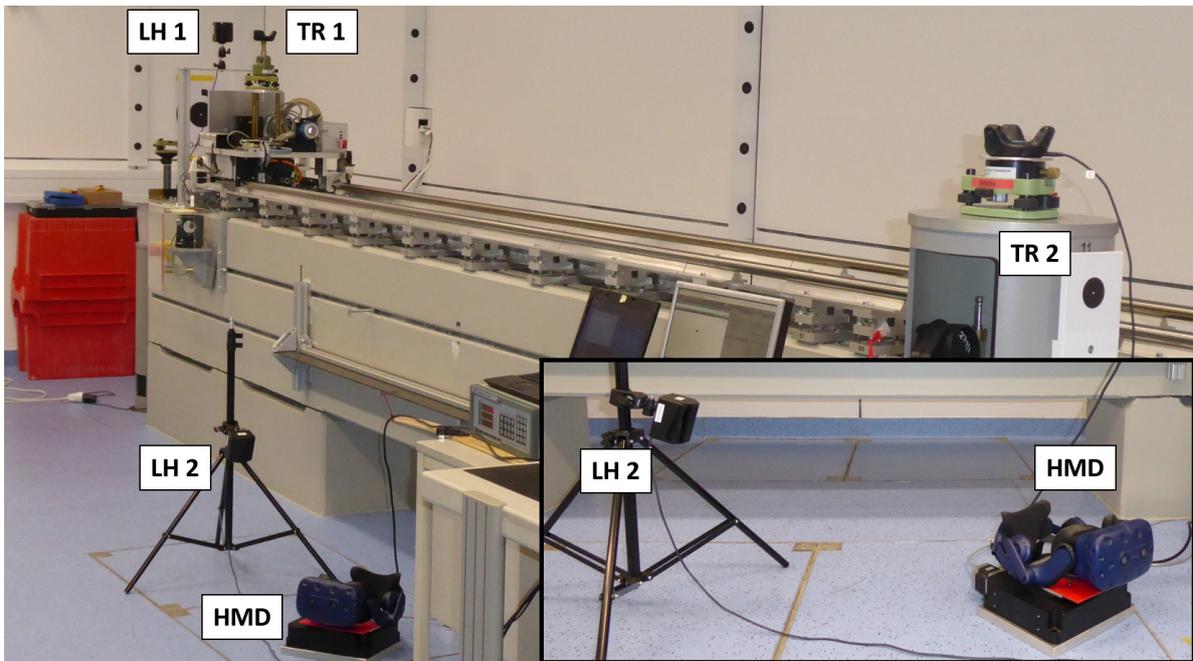


Abbildung 4.79: Messaufbau Komparator Distanz 2 - Ansicht Lighthouse 2

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Untersuchungen des Orientierungsverhaltens des Trackers in Abschnitt 4.4.2 wurde auch die Orientierung des Trackers im Versuch *Komparator Distanz 2* analysiert. Betrachtet man die Abbildung 4.80, erkennt man, dass es bei der Hinmessung bei einem Abstand von 3,25 m zum Lighthouse zu Veränderungen der Orientierung der Y- und Z-Achse gekommen ist. Bei den Standardabweichungen der Orientierungen in Abbildung 4.81 fällt auf, dass die Standardabweichung der X-Achse mit einem Maximum von 0,2 gon deutlich geringer als die Werte der Y- und Z-Achse ausfällt. Dieses Bild hat sich auch schon bei den vorangegangenen Untersuchungen gezeigt. Die Ausreißer der Z-Achse lassen sich, wie auch schon zuvor, durch den Wechsel zwischen 0 und 400 gon erklären und können vernachlässigt werden. Im Unterschied zum Orientierungssprung in Abschnitt 4.5.1 verändert sich in diesem Versuchsaufbau die Standardabweichung vor und nach dem Sprung nicht. Die Werte von 0,6 bis 1,8 gon passen mit der Größenordnung der Werte des in Abschnitt 4.4.2 beschriebenen Falles 2 zusammen. Dies weist, laut den Untersuchungen zum erzwungenen Sprung in Abschnitt 4.5.1, auf die richtige Darstellung des Trackers in Unity über den gesamten Zeitraum hin. Das lässt vermuten, dass dieser Koordinaten- und Orientierungssprung durch den Wechsel des Bezugslighthouses verursacht wurde und somit, obwohl die Auswirkungen ähnlich sind, wie beim zuvor beschriebenen Orientierungssprung des Trackers (Abschnitt 4.5.1), eine andere Ursache hat.

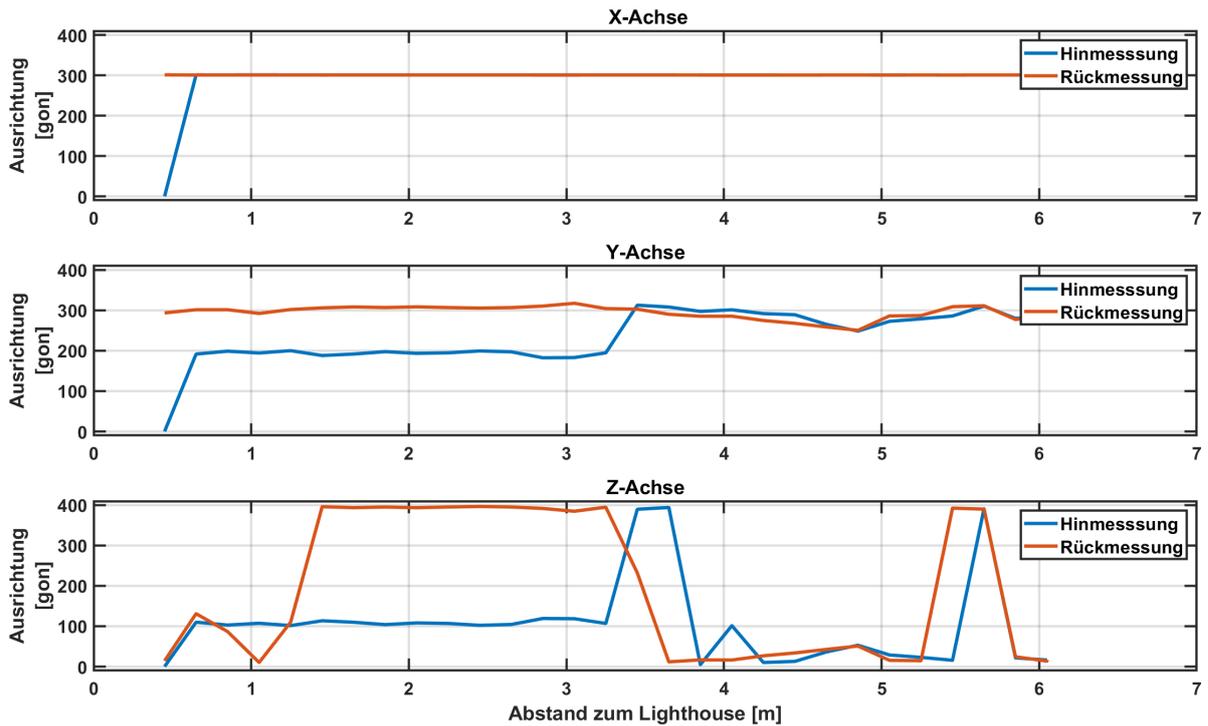


Abbildung 4.80: Orientierungssprung des Trackers M2 bei der Untersuchung des Messbereichs

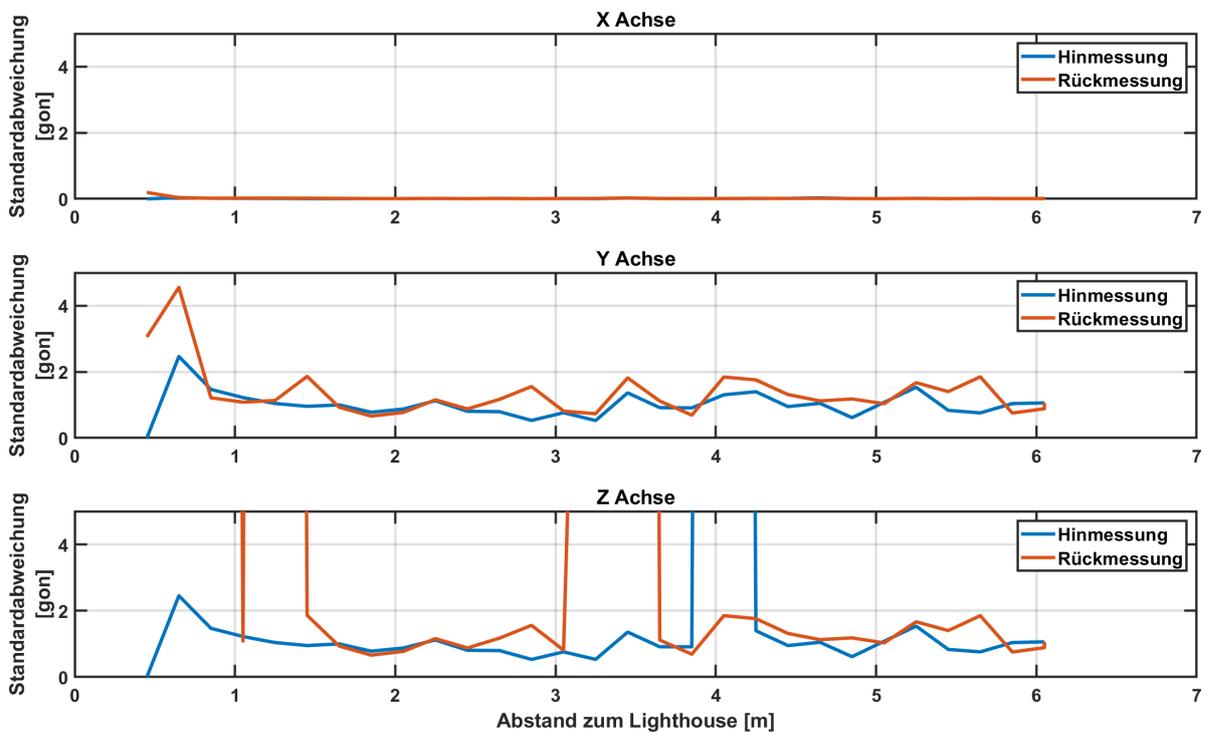


Abbildung 4.81: Standardabweichung der Orientierung des Trackers M2 bei der Untersuchung des Messbereichs

4.6 Untersuchung des Koordinatensystems

In den vorangegangenen Untersuchungen lag der Fokus auf den devicebezogenen Einflüssen auf die Genauigkeit des VR-Systems. Während der Versuche, vor allem bei der Analyse des Koordinatensprungs in Abschnitt 4.5.2, sind einige Fragen und Auffälligkeiten bezüglich der Definition und Stabilität des vom System aufgespannten Referenzrahmens aufgetaucht. Speziell bei der Verwendung von mehreren Lighthouses kam es in den beschriebenen Versuchen zu undefinierten Sprüngen im Koordinatensystem, von welchen nicht nur ein Device betroffen war. Dies wurde zum Anlass genommen, die folgenden Versuche durchzuführen.

4.6.1 Wie wird das Koordinatensystem definiert?

Wie schon in Abschnitt 3.1 erklärt wurde, erfolgte die Berechnung der Daten in der Software von SteamVR. Somit ist diese auch für die Bestimmung des Koordinatensystems verantwortlich. Grundsätzlich ist das System nach dem Aufstellen ohne eine Kalibrierung lauffähig, eine Neubestimmung ist aber für den richtigen Abstand zum Boden notwendig. Außerdem verbessert sie die Stabilität des Systems. Die Neubestimmung des Koordinatensystems wird am PC in der Software von SteamVR unter dem Menüpunkt Raumvermessung (RoomSetup) ausgelöst. Es können zwei Varianten gewählt werden. Die angeführten Erkenntnisse haben sich während der zuvor beschriebenen Untersuchungen gezeigt und wurden nicht explizit untersucht.

- **NUR STEHPOSITION**

Bei dieser Variante wird davon ausgegangen, dass der Nutzer seine Position nicht verändert. Für die Bestimmung des Koordinatensystems ist nur das HMD notwendig. Das Zentrum und die Ausrichtung des Koordinatensystems werden durch das HMD bestimmt. Der Abstand zum Boden muss vom Nutzer gemessen und eingegeben werden.

- **RAUMFÜLLENDE VR**

Bei der Variante der RAUMFÜLLENDE VR kann der Nutzer sich einen Spielbereich definieren. Der Vorteil dieser Variante ist, dass die in der Realität definierten Grenzen auch in der VR angezeigt werden können. Somit kann verhindert werden, dass der Nutzer gegen reale Hindernisse stößt, welche außerhalb der definierten Grenzen liegen. Die Vermessung des Spielbereichs erfolgt mit dem Controller. Nachdem der mögliche Spielbereich vom Nutzer eingezeichnet wurde, wird von SteamVR automatisch das größtmögliche Rechteck in diesem Bereich berechnet und dadurch werden die Spielfeldgrenzen bestimmt. Das Koordinatenzentrum und die Achsausrichtung hängen von diesen Grenzen ab. Die Bestimmung der Bodenebene erfolgt durch Auflegen der beiden Controller am Boden.

In beiden Varianten wird von SteamVR der Bezug zur realen Welt über die Bodenebene hergestellt. Da sowohl HMD, Controller als auch die Lighthouses über eine IMU verfügen (Abschnitt 3), ist anzunehmen, dass die Bestimmung der Horizontalebene über die Messung der Erdbeschleunigung erfolgt.

Bei den beschriebenen Versuchen wurde hauptsächlich die Variante RAUMFÜLLENDE VR verwendet.

4.6.1.1 Untersuchung der Horizontalebene

In der Untersuchung des Vorgängersystems (HTC Vive) durch Niehorster et al. (2017) wurde entdeckt, dass zwischen der Horizontalebene des VR-Systems und der realen Welt eine Verkippung besteht. Aus diesem Grund wurde auch eine Untersuchung dieser Problematik beim HTC Vive Pro System durchgeführt.

Mit den Daten aus den in Abschnitt 4.3.2.1 durchgeführten Untersuchungen *Komparator Öffnungswinkel (1m)* am Horizontalkomparator konnte diese Hypothese untersucht werden. Wichtig dabei ist, dass es im Versuchsaufbau zu keinen Koordinatensprüngen gekommen ist. Das Schienensystem des Horizontalkomparators weist, wie in Abschnitt 4.2.2.1 beschrieben, eine maximale Abweichung von 2 mm in der Horizontale auf. Betrachtet man nun die Abweichungen der gemessenen Höhenwerte zum Mittelwert (Abbildung 4.82), bestätigt sich die bereits beim HTC Vive System der ersten Generation entdeckte Verkippung auch beim aktuellen System. Auf der gefahrenen Distanz von 4,5 m hat sich eine Höhenänderung von 60 mm gezeigt. Es wurde nicht genauer untersucht, in welche Richtung die Ebene verkippert ist. Somit kann keine Größenordnung der Verkippung angegeben werden.

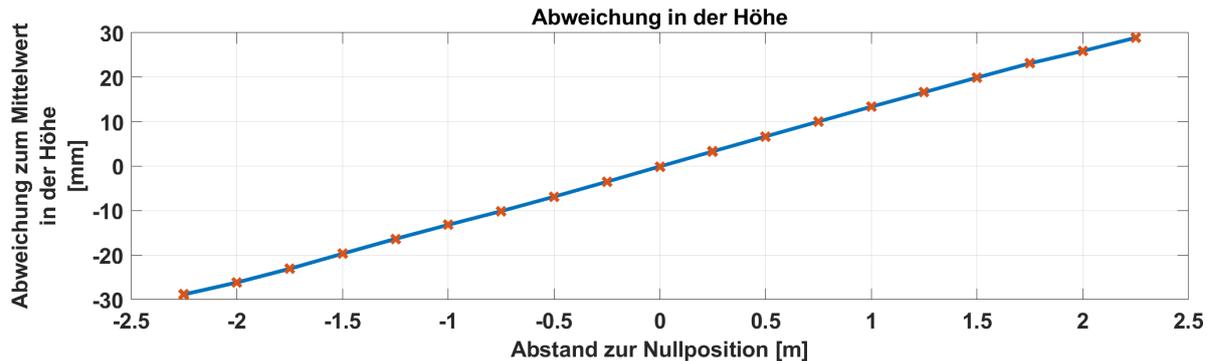


Abbildung 4.82: Abweichungen in der Höhe beim Verfahren am Horizontalkomparator

4.6.2 Stabilität des Koordinatensystems

In den devicebezogenen Untersuchungen kam es immer wieder zu Sprüngen des Koordinatensystems. In Abbildung 4.83 sind solche Sprünge von bis zu 17 mm zu sehen. Diese Daten stammen aus der Untersuchung des Rotationsverhaltens mit zwei Lighthouses aus Abschnitt 4.3.5.4.

In den Abbildungen 4.84 und 4.85 ist die Lage der Komponenten im Versuchsaufbau dargestellt. Die Lighthouses waren in einem Abstand von ca. 2 m zum Tracker aufgestellt und die Stative maximal ausgefahren. Der Tracker wurde mittels Präzisionsträgers und dem zugehörigen Adapter (Abschnitt 4.2.3.1) auf einem Pfeiler stabilisiert. Beim Start der ersten Rotation war der Tracker auf das Lighthouse 2 ausgerichtet. Das HMD war am Drehtisch montiert und wurde mit diesem alle drei Minuten abwechselnd um $+90^\circ$ bzw. -90° gedreht. Die beiden Controller waren in der Nähe des HMD am Boden abgelegt.

In Abbildung 4.86 sind die Werte der Y-Achse des Trackers sowie der beiden Lighthouses dargestellt. Es ist deutlich ersichtlich, dass die drei Sprünge des Trackers auch in den Daten des Lighthouses 1 zu erkennen sind. Zusätzlich gab es auch einen Sprung, welcher sich nicht auf den Tracker auswirkte. Anhand der zweidimensionalen Darstellung der Abweichungen in Abbildung 4.87 ist zu erkennen, dass der Tracker mit den Koordinatensprüngen auch die Ausrichtung des Rauschens verändert. Dadurch zeigt sich, dass der Tracker das Bezugslighthouse gewechselt hat. Der Sprung in der Koordinate des Lighthouses 1 innerhalb der zweiten Umdrehung (Abbildung 4.86) ist in den Trackerdaten nicht vorhanden, da dieser zu diesem Zeitpunkt das Lighthouse 2 für die Positionsbestimmung verwendet hat.

Um das System aktiv zu halten, wurde die Brille alle drei Minuten gedreht. Anhand der Daten der Brille (Abbildung 4.86) ist zu erkennen, dass die Sprünge der Koordinaten des Lighthouse 1 mit diesen Drehungen zusammenhängen. Die Sprünge treten immer am Beginn oder Ende einer Bewegungsphase auf. Auffällig ist auch, dass die Daten der Brille eine Änderung der Systematik aufweisen. Dies scheint mit den Koordinatensprüngen zusammenzuhängen.

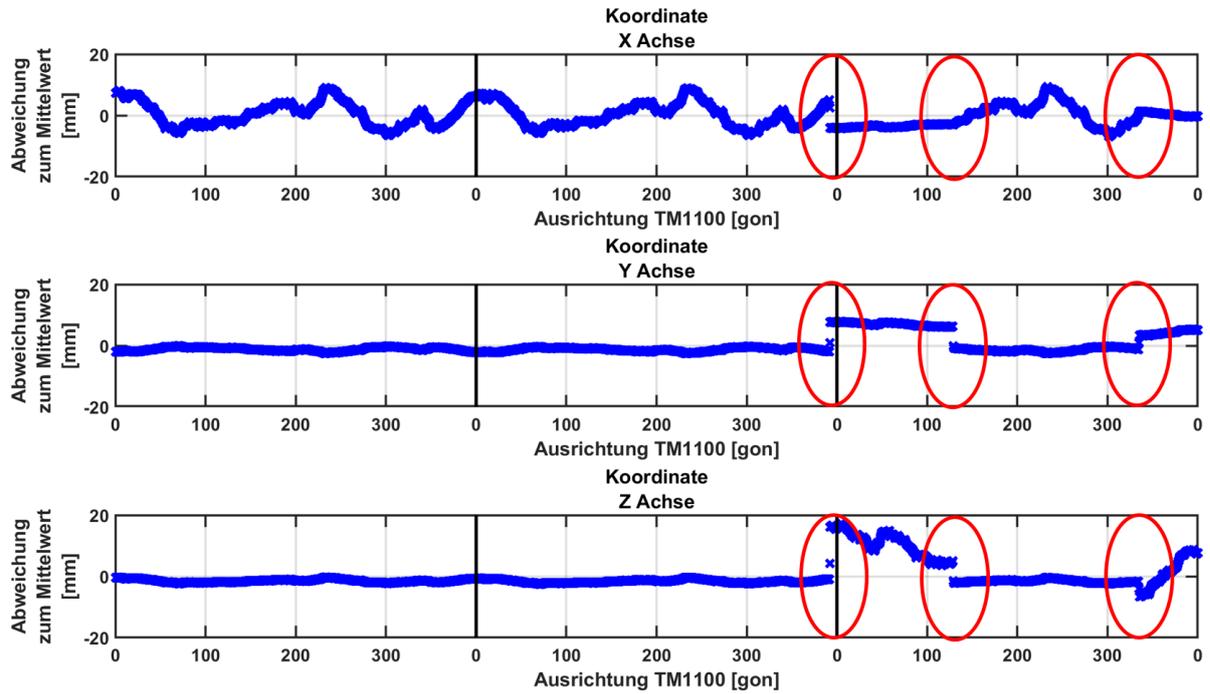


Abbildung 4.83: Sprunghaftes Verhalten des Trackers bei Rotation mit zwei Lighthouses

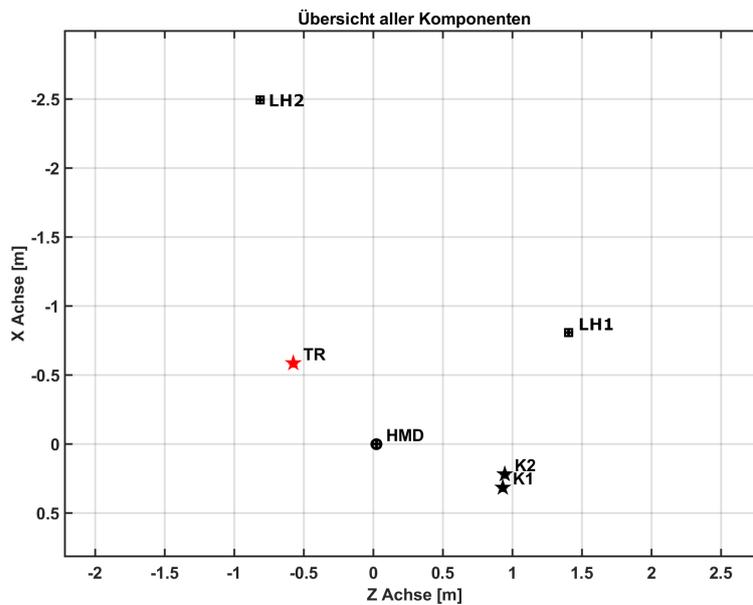


Abbildung 4.84: Versuchsaufbau - Lage der Komponenten

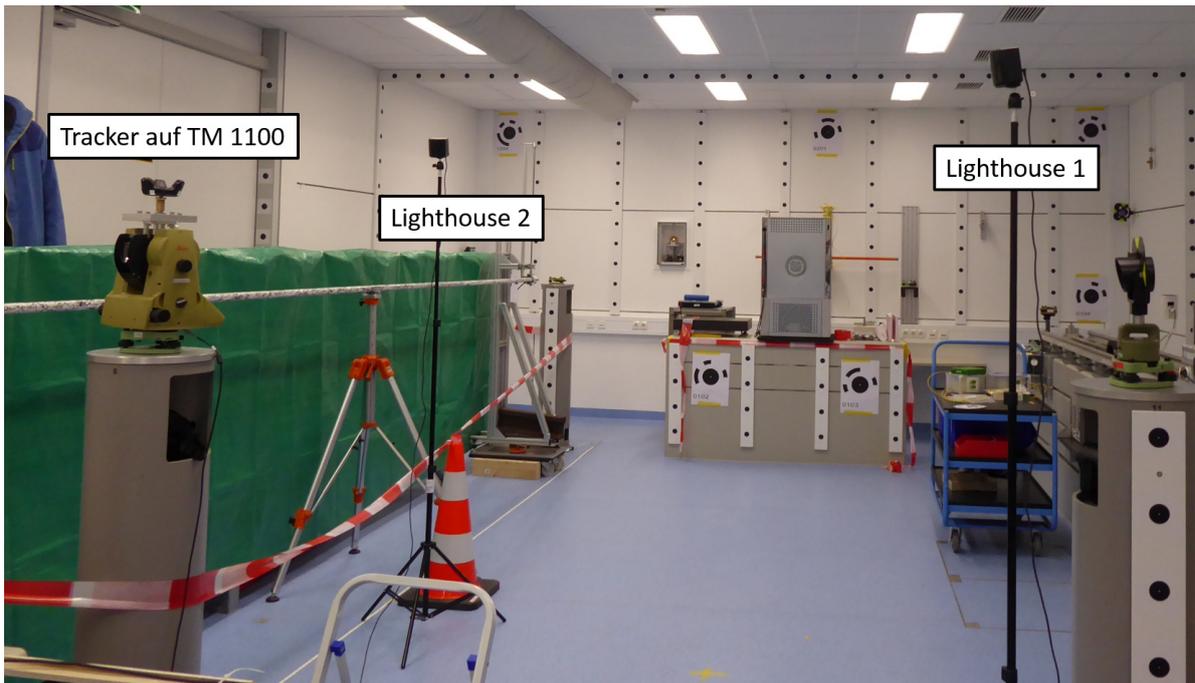


Abbildung 4.85: Versuchsaufbau - Rotation mit 2 Lighthouses - Koordinatensprung

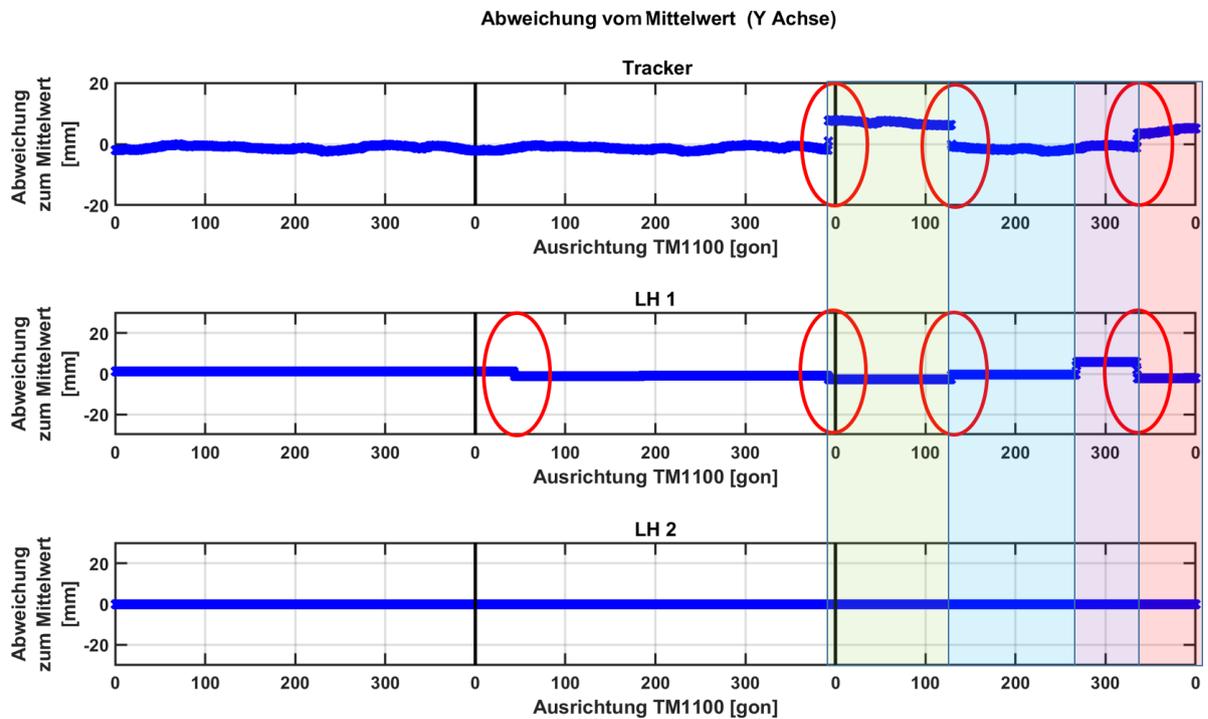


Abbildung 4.86: Sprunghaftes Verhalten des Trackers und eines Lighthouses bei Rotation mit zwei Lighthouses

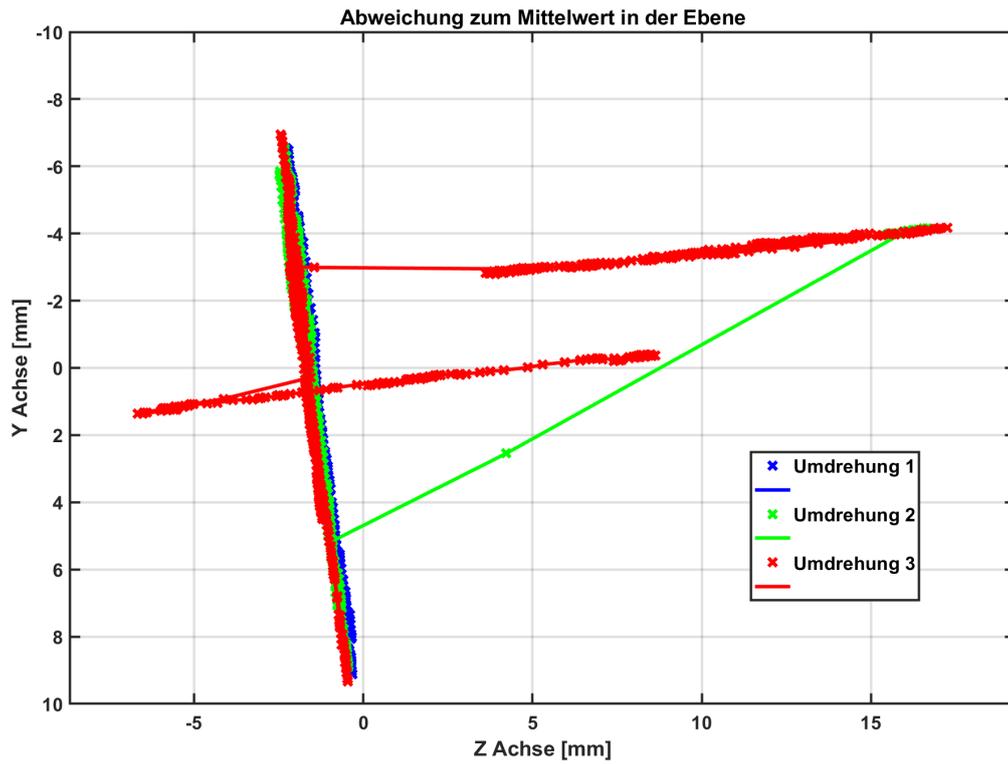


Abbildung 4.87: Sprunghaftes Verhalten des Trackers in der Y- Z-Ebene

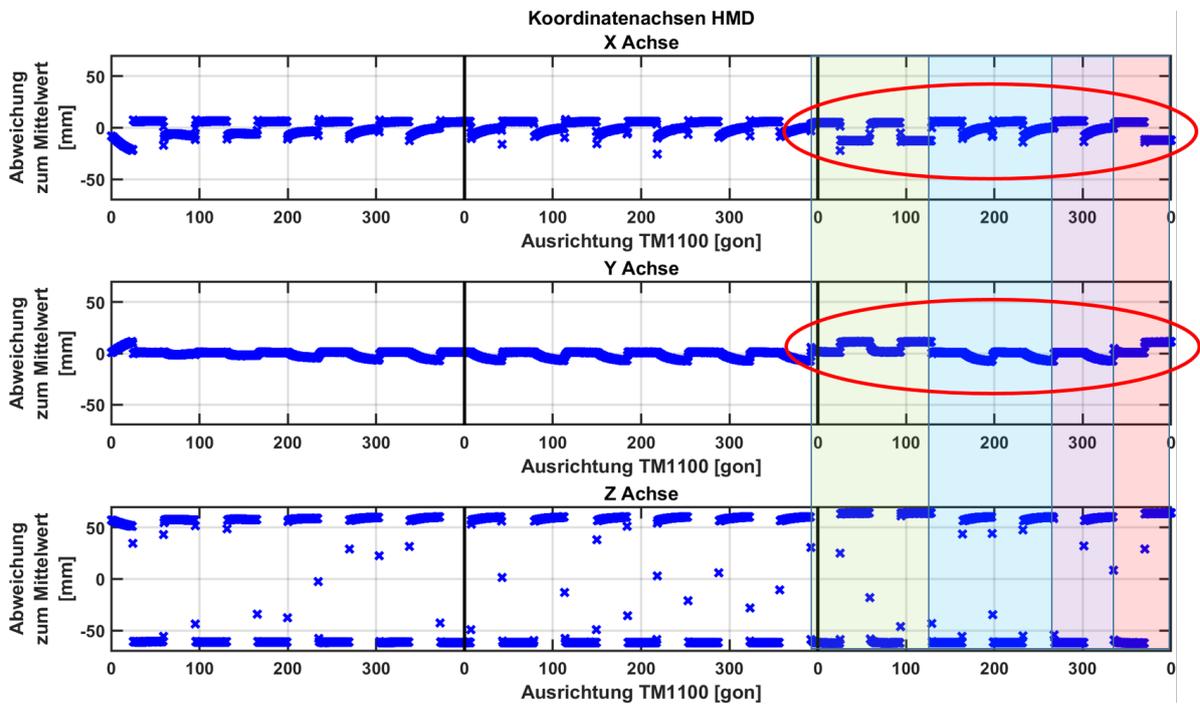


Abbildung 4.88: Sprunghaftes Verhalten des HMD bei Rotation mit zwei Lighthouses

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es bei der Verwendung von mehr als einem Lighthouse zu Koordinatensprüngen von bis zu 20 mm kommen kann. Die Instabilität des Koordinatensystems wird vermutlich durch Spannungen zwischen den beiden Lighthouses verursacht. Ein Sprung in den Daten eines Lighthouses hat nur Auswirkungen auf die Devices, welche ihre Positionsbestimmung über dieses Lighthouse durchführen.

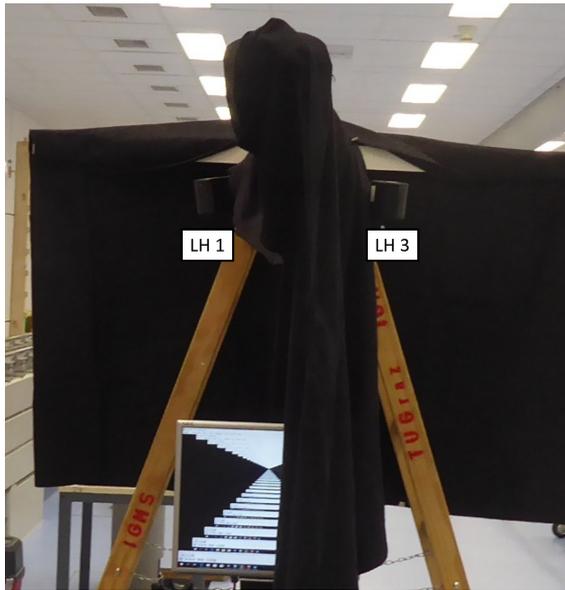
4.6.3 Untersuchung der Bestimmung der Position und Orientierung der Lighthouses

Aufgrund der vorangegangenen Untersuchungen wird vermutet, dass das System eine Priorisierung der Lighthouses vornimmt. Wie die Bestimmung der Lighthousekoordinaten erfolgt, ist nicht näher bekannt. Es wird aber vermutet, dass diese ausgehend vom ersten Lighthouse über das HMD bestimmt werden. Aus diesem Grund wurden Versuche mit drei Lighthouses durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, herauszufinden, wie stabil die Übergänge zwischen den Lighthouses erfolgen können und wie reproduzierbar die Positionen der Lighthouses sind.

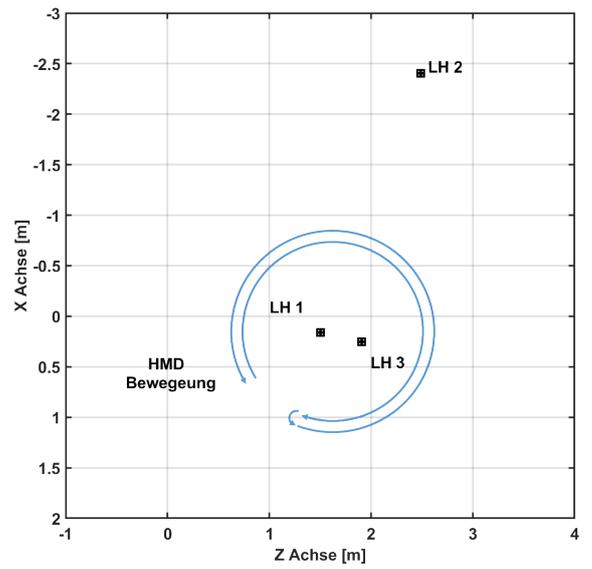
Wie in Abbildung 4.89 dargestellt ist, wurden die drei Lighthouses so positioniert, dass sie sich gegenseitig nicht sehen. Die Brille wurde anschließend in einem Kreisbogen um das Lighthouse 1 und 3 getragen. Es wurde darauf geachtet, dass im Übergangsbereich zwischen zwei Lighthouses durchgehend eine Sichtverbindung zu beiden gegeben war. Gestartet wurde der Versuch mit einem RoomSetup, bei welchem nur das Lighthouse 1 sichtbar war. Vor Beginn der Aufzeichnung wurde eine Initialisierung aller Lighthouses durchgeführt, und anschließend im Sichtbereich des Lighthouse 1 die Messung gestartet. Nach der Umrundung der beiden Lighthouses im Zentrum war für eine gewisse Messphase wieder nur das Lighthouse 1 sichtbar. Anschließend wurde das HMD wieder in die entgegengesetzte Richtung zurückbewegt und der Versuch an der Ausgangsposition beendet.

In Abbildung 4.90 sind die Abweichungen der Lighthousekoordinaten zum Mittelwert der gesamten Messdauer dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es zu mehreren Koordinatensprüngen gekommen ist. Obwohl der Versuch mit dem Lighthouse 1 begonnen wurde, scheint das Lighthouse 3 als Master Lighthouse festgelegt worden zu sein. Im Unterschied zu Lighthouse 1 und 2 zeigt dieses keine Koordinatensprünge. Die Abweichungen der Lighthouses 1 und 2 sind bis zu 34 mm groß. In Grün ist die Sichtbarkeit der Lighthouses für die Brille hinterlegt. Hierbei fällt auf, dass die Koordinatensprünge immer zum Zeitpunkt des Sichtbarwerdens eines zusätzlichen Lighthouses oder kurz davor passieren. Hervorzuheben ist, dass die Sprünge immer nur bei einem Lighthouse auftreten. Daraus lässt sich ableiten, dass der Koordinatenberechnung kein Netzausgleich zugrunde liegt, da in diesem Fall bei einer Korrektur alle Lighthouses betroffen wären.

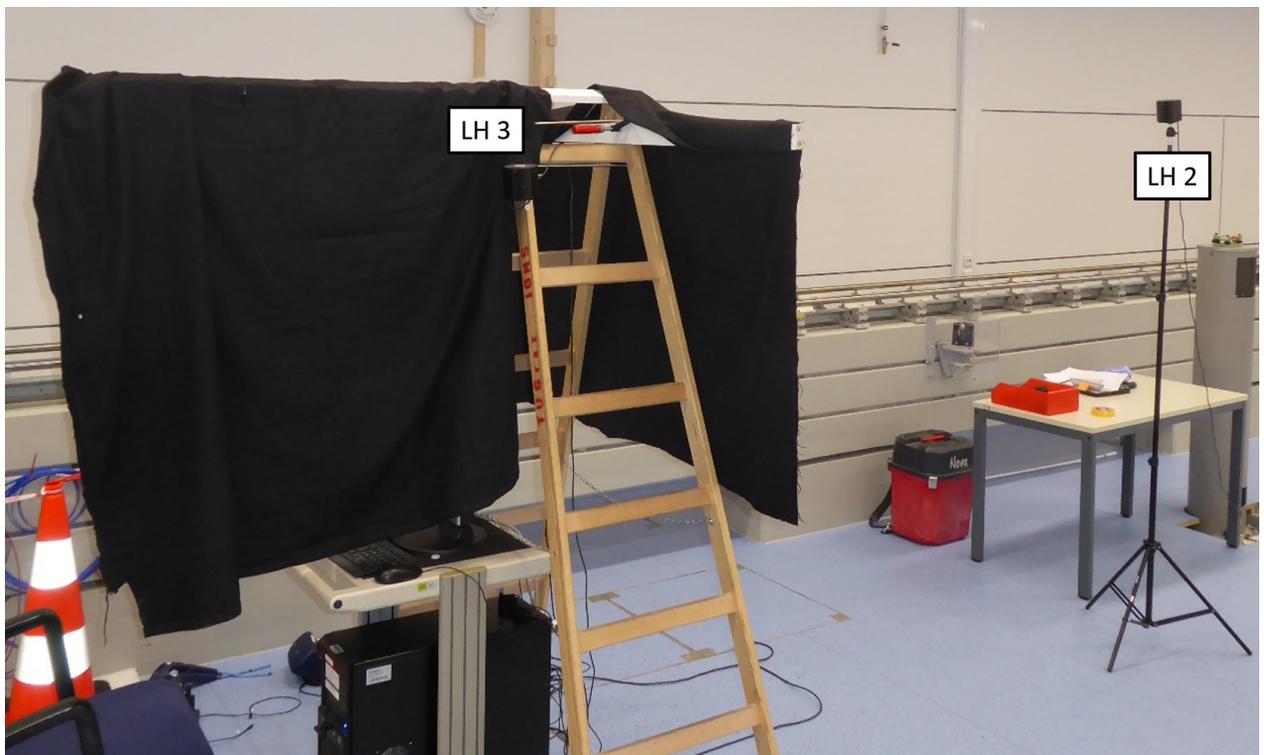
Somit kann zusammengefasst werden, dass die Koordinaten der Lighthouses abhängig von den Koordinaten der beiden zu diesem Zeitpunkt sichtbaren Stationen bestimmt werden. Wenn die aktuellen Daten nicht mit den Messungen übereinstimmen, wird eines der beiden Lighthouses korrigiert. Zusätzlich dazu bestätigt sich auch die Vermutung der Priorisierung der Lighthouses. Es ist jedoch nicht erkennbar, wonach entschieden wird, welches Lighthouse nachgeregelt wird. Es war aber in jedem durchgeführten Versuch ein Lighthouse ohne Sprung vorhanden. Wie in Abbildung 4.91 ersichtlich ist, war durch die Überlappung der Sichtbereiche eine relativ stabile Positionierung des HMD möglich. Es ist nur ein Koordinatensprung beim HMD erkennbar. In weiteren Untersuchungen, bei denen sich die Sichtbereiche der Lighthouses nicht überlappten, konnte gezeigt werden, dass dadurch die Anzahl der Ausreißer bei der Position der HMD ansteigt.



(a) Ansicht LH 1 und 3



(b) Übersicht der Komponenten



(c) Ansicht LH 2 und 3

Abbildung 4.89: Messaufbau Lighthouseübergang mit überlappendem Bereich

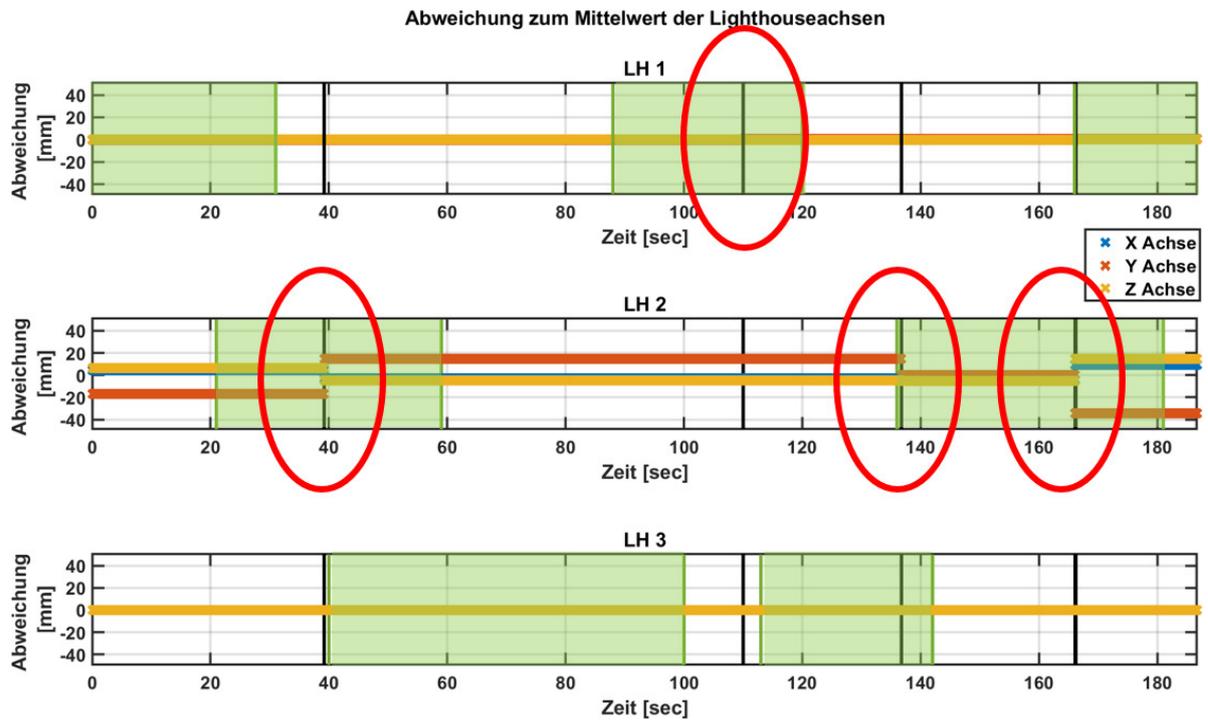


Abbildung 4.90: Sprunghaftes Verhalten der Lighthouses beim überlappenden Übergang ohne Sichtverbindung (grüne Bereiche markieren die Phasen in denen die Lighthouses für die Brille sichtbar waren)

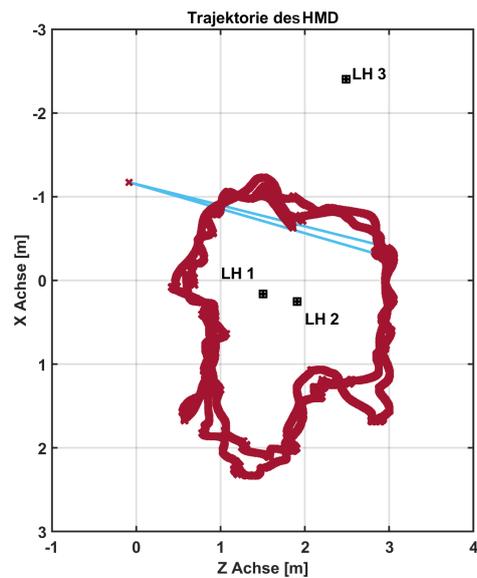


Abbildung 4.91: Trajektorie des HMD in Referenz zu den Lighthouses

4.7 Vergleichsmessungen mit VRED

Wie schon in Abschnitt 4.2.4.2 beschrieben wurde, war es mit VRED nicht möglich, die Daten der Lighthouses auszulesen. Aus den beschriebenen Messungen und Ergebnissen geht hervor, dass die Daten der Lighthouses aber eine wichtige Rolle in der Interpretation der Messergebnisse spielen. Da beim Projektpartner Magna nicht Unity, sondern VRED eingesetzt wird, war es gewünscht, auch Versuche mit VRED durchzuführen. Im Folgenden werden die mit VRED durchgeführten Vergleichsmessungen kurz beschrieben und entdeckte Unterschiede zwischen VRED und Unity erläutert.

4.7.1 Vergleich der Rotation des Trackers

Ein Messversuch, welcher auch mit der Aufzeichnungsvariante VRED durchgeführt werden konnte, war der *Rotationstest Tracker* aus Abschnitt 4.3.5.1. Mithilfe dieser Daten war es möglich, einige der zuvor für Unity getätigten Aussagen zu bestätigen, aber auch Unterschiede aufzuzeigen.

Wie in Abbildung 4.92 ersichtlich ist, zeigen die rotationsabhängigen Abweichungen, wie auch bei der Aufzeichnung mit Unity, eine elliptische Form. Diese ist auch auf das Lighthouse ausgerichtet. Die exakten Koordinaten des Lighthouses konnten, wie in Abschnitt 4.2.4.2 beschrieben ist, nicht ausgelesen werden, da diese in VRED nicht zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund konnte die Längs- und Querrichtung nicht in Abhängigkeit der Richtung zum Lighthouse berechnet werden. Beim Vergleich der Abbildung 4.36 (Abschnitt 4.3.5.1) und Abbildung 4.93 ist darauf zu achten, dass die Höhenkomponente im Koordinatensystem von VRED in der Z-Achse dargestellt wird. Da das Koordinatensystem im Versuch mit VRED nahezu parallel zur Richtung zwischen Tracker und Lighthouse ausgerichtet war, können die Anteile in Längs- und Querrichtung annähernd in der X- bzw. der Y-Achse abgelesen werden. Auch hier ist kein Unterschied zu den Erkenntnissen aus Abschnitt 4.3.5.1 erkennbar. Betrachtet man das statische Messrauschen bei Messungen mit einem (Abbildung 4.94b) bzw. mit zwei Lighthouses (Abbildung 4.94a), zeigt sich, wie auch schon bei der Messung mit Unity (Abschnitt 4.3.1), ein elliptisches bzw. isotropes Rauschbild.

Bezogen auf die Koordinatenmessung konnte somit kein Unterschied zwischen VRED und Unity festgestellt werden.

Bei der Analyse der mit VRED gemessenen Orientierungen zeigt sich jedoch ein Unterschied zwischen Unity und VRED. Vergleicht man die Differenzen zur ersten Umdrehung in Abbildung 4.95 mit denen aus Abschnitt 4.4.2, welche in Abbildung 4.96 erneut dargestellt sind, sind diese vergleichbar mit den Ergebnissen im Fall 1 der Unity-Messung. Die Abweichungen zur Referenz (Abbildung 4.97) sind im Vergleich zu den Daten von Unity, welche auch in der Grafik dargestellt sind, ebenfalls ähnlich. Der in Abschnitt 4.4.2 beschriebene Fall 1 ist in Unity mit einer fehlerhaften Darstellung verbunden. Bei den mit VRED gemessenen vergleichbar guten Werten wurde diese fehlerhafte Darstellung nicht beobachtet. Außerdem ist, wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben, der Fall 1 bei Unity nur durch den Ausfall bzw. das Abschalten eines Controllers zu erreichen. Der Fall 2, welcher der Standardfall in Unity ist, zeigt deutlich höhere Abweichungen als der Fall 1 und somit auch als VRED. Somit scheint der Fehler in der Positionsbestimmung des Trackers, welcher in Unity vermutet wird, im Standardfall bei VRED nicht zu bestehen.

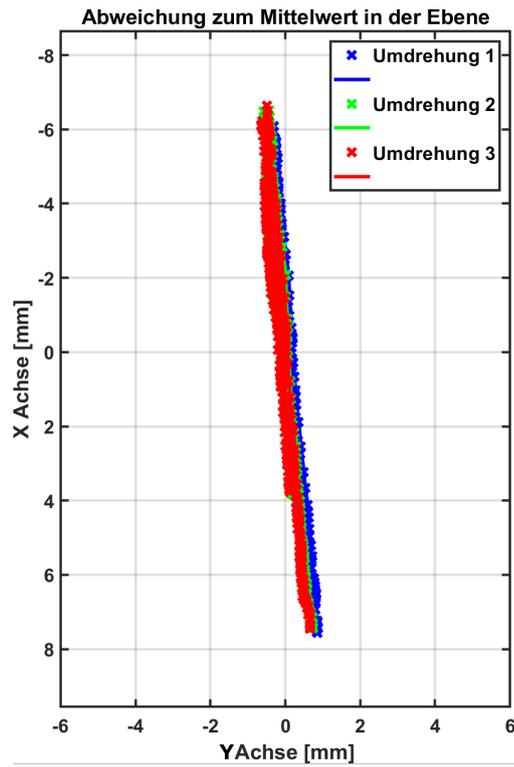


Abbildung 4.92: Abweichungen durch Rotation des Trackers in der Lage bei Aufzeichnung mit VRED

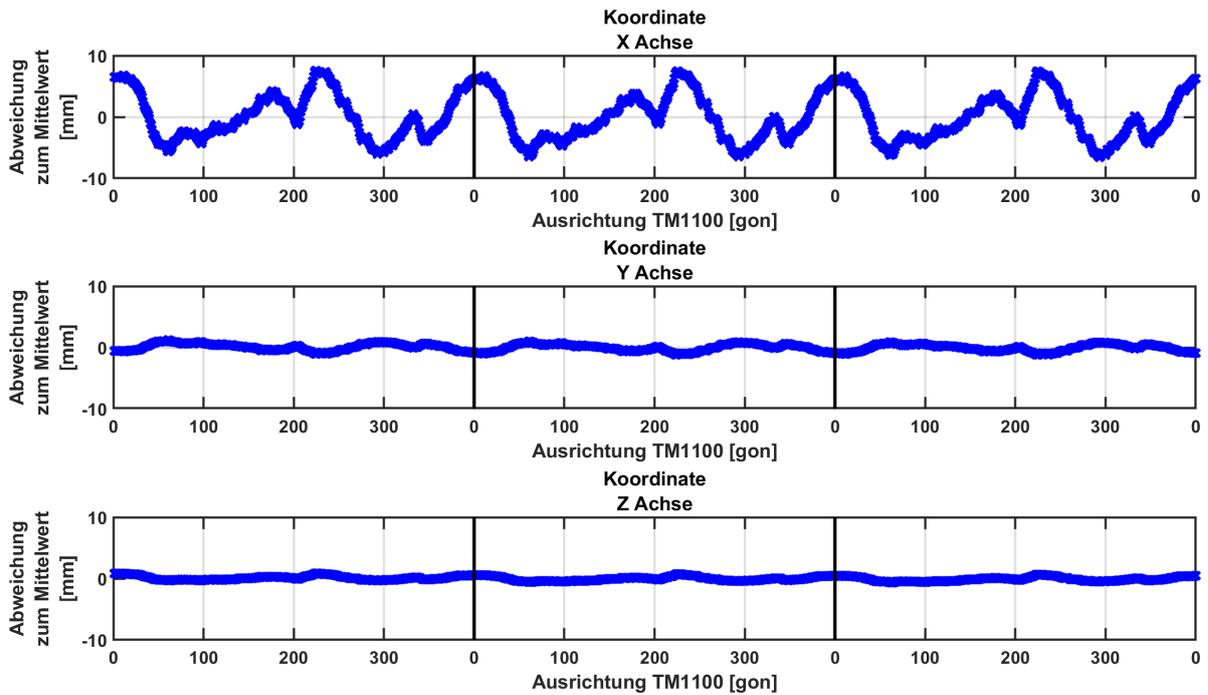


Abbildung 4.93: Abweichungen durch Rotation des Trackers in der Lage bei Aufzeichnung mit VRED

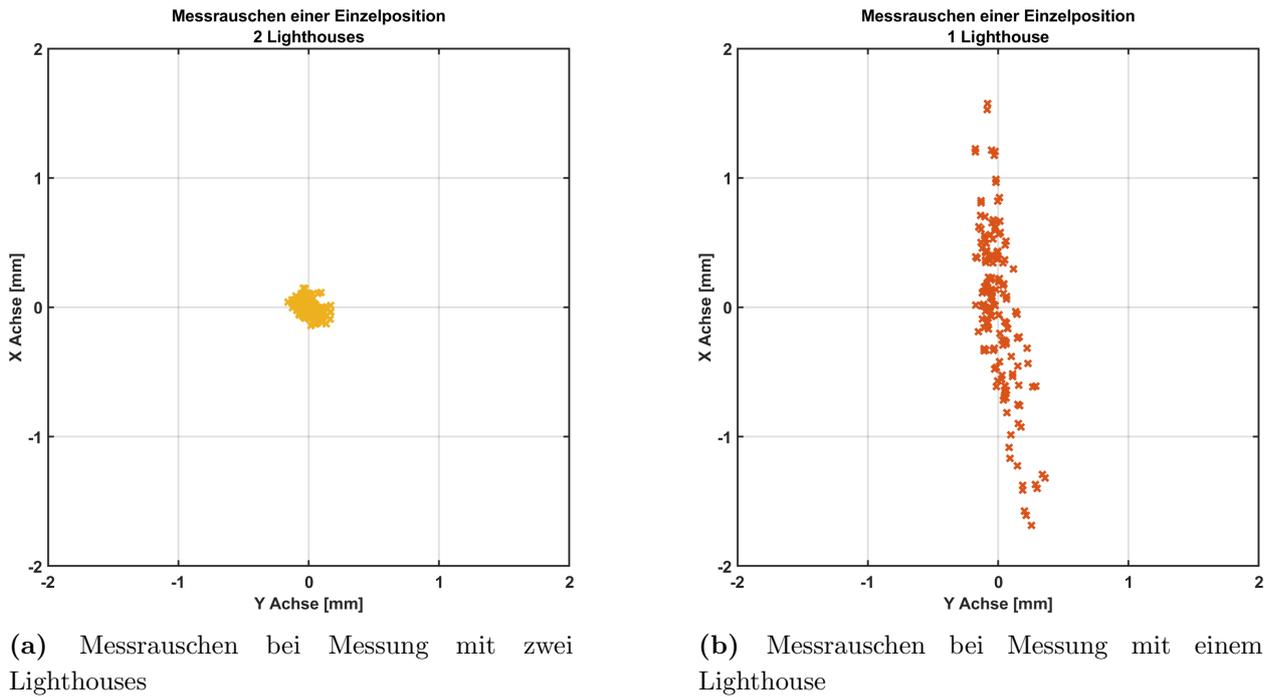


Abbildung 4.94: Messrauschen bei Aufzeichnung mit VRED

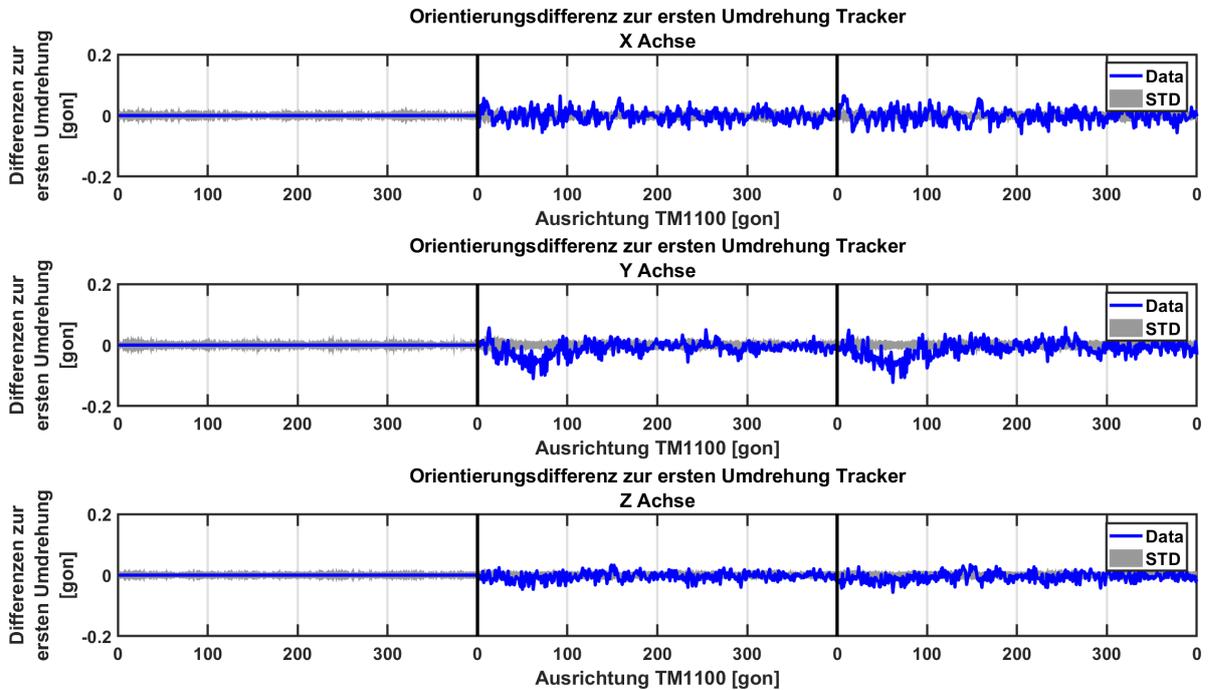


Abbildung 4.95: Orientierungswerte des Trackers bei Rotation - aufgezeichnet mit VRED

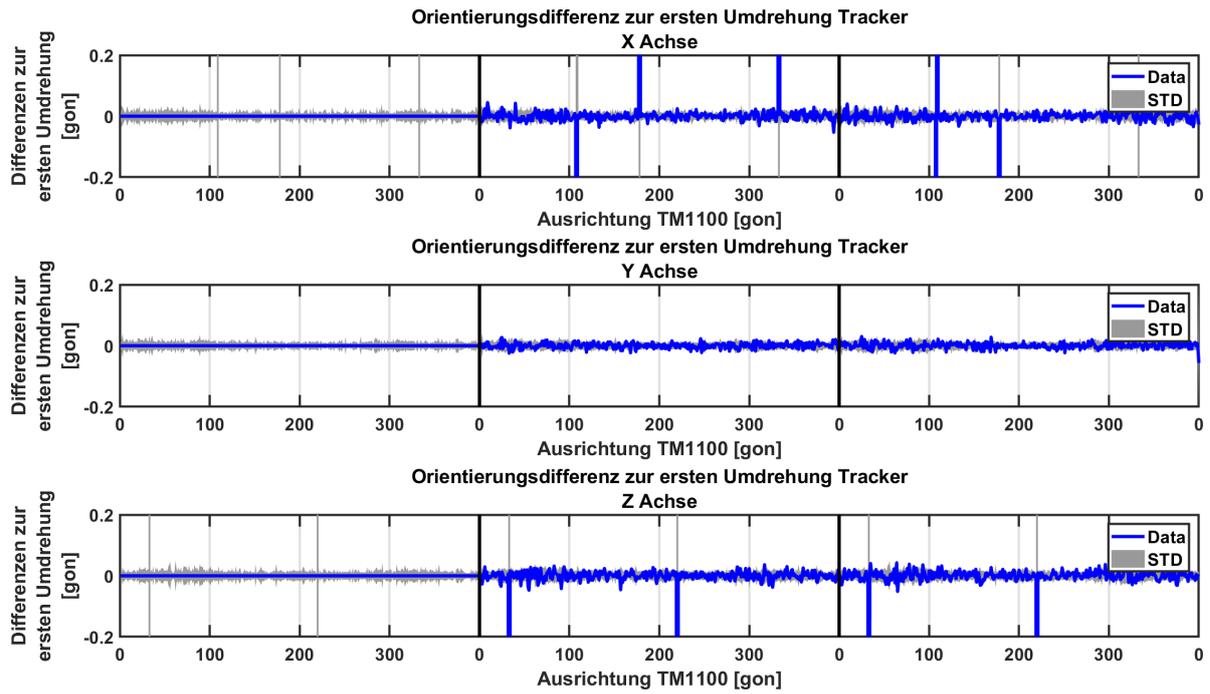


Abbildung 4.96: Orientierungswerte des Trackers bei Rotation - aufgezeichnet mit Unity (Fall 1)

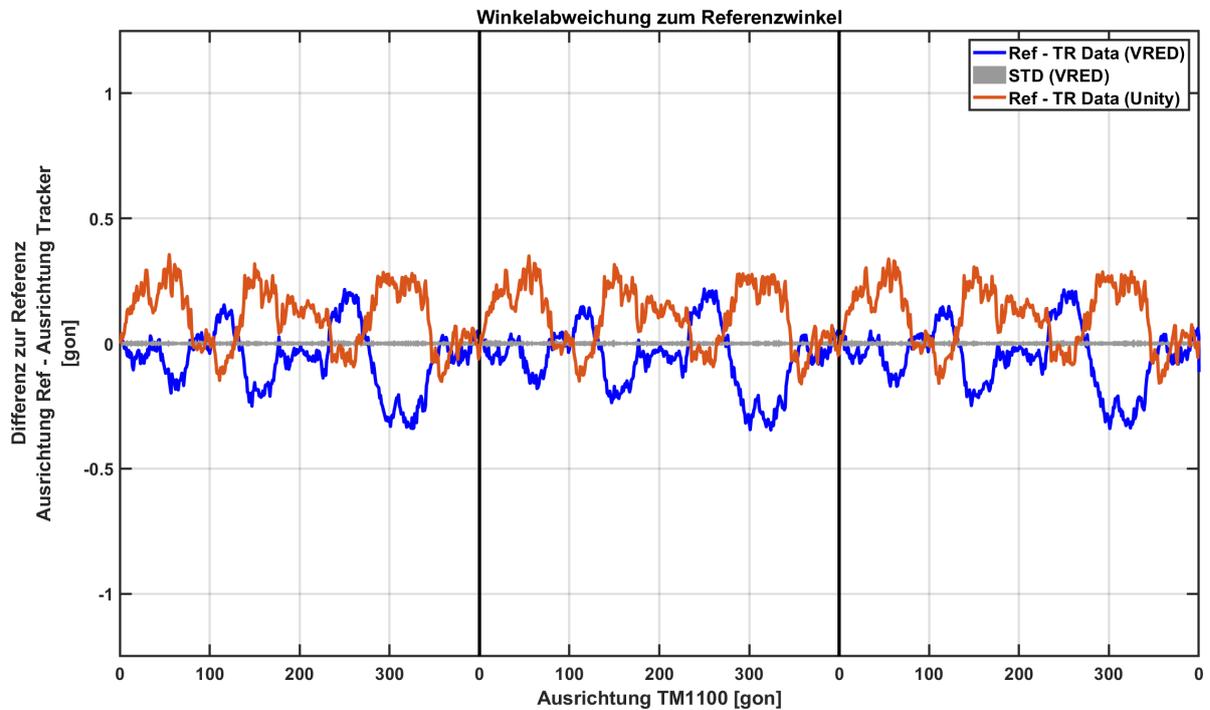


Abbildung 4.97: Abweichungen zur Referenz der Orientierung bei Rotation des Trackers - aufgezeichnet mit VRED

4.7.2 Vergleich Orientierungssprung

Da bei der Auswertung der Rotationsversuche Unterschiede zwischen VRED und Unity in Bezug auf die Messung/Berechnung der Orientierung entdeckt wurden, wurde auch der Versuch *Orientierungssprung Tracker* (Abschnitt 4.5.1) wiederholt und mit VRED aufgezeichnet.

Wie aus den Abbildungen 4.98 und 4.99 ersichtlich ist, kam es auch bei der Verwendung von VRED zu Koordinaten- bzw. Orientierungssprüngen. Die Änderung der Darstellung erfolgte ebenfalls gleich wie bei Unity um 90° . Im Unterschied zur Datenaufzeichnung mit Unity (Abschnitt 4.5.1) ändert sich bei den Daten, welche mit VRED aufgezeichnet wurden, die Standardabweichung vor und nach dem Sprung jedoch nicht.

Diese Untersuchung hat somit gezeigt, dass es auch bei der Verwendung des HTC Vive Pro Systems mit VRED Probleme mit der Zuordnung der Devicestreams gibt und sich die Darstellung des Trackers ändert, wenn die Controller ausfallen.

Im Unterschied zu Unity gibt es aber bei VRED im Standardfall (Tracker wird richtig angezeigt) keine Probleme mit der Berechnung der Orientierung.

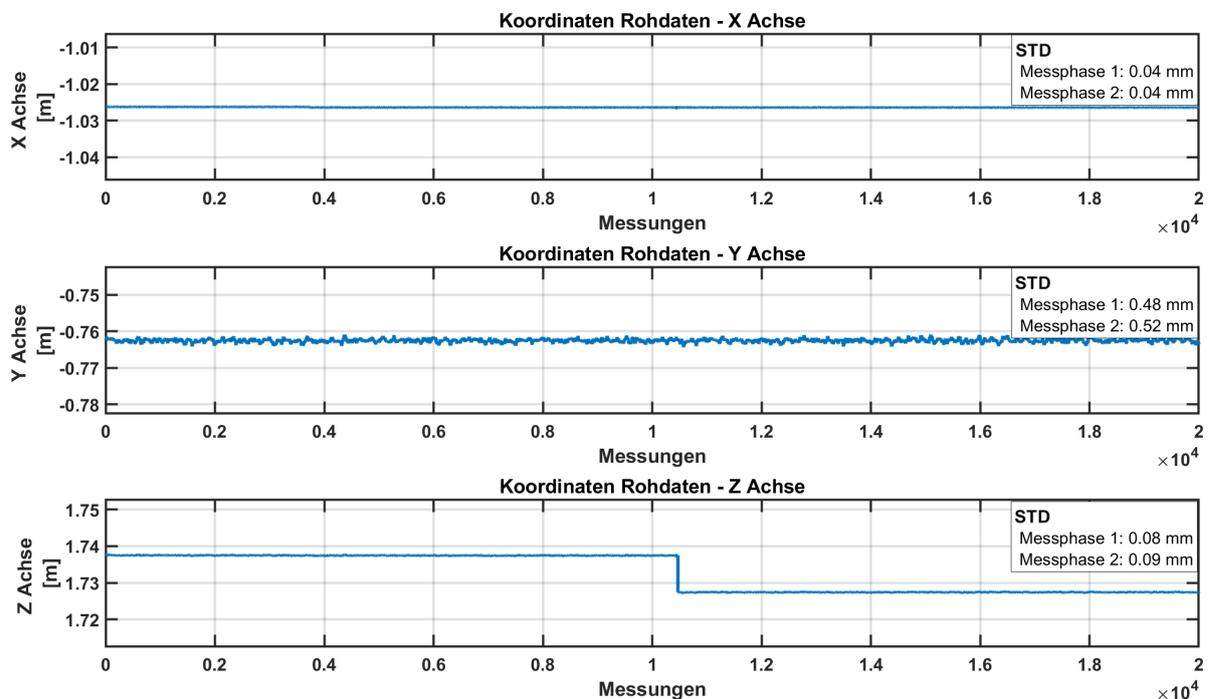


Abbildung 4.98: Koordinaten bei erzwungenem Orientierungssprung - aufgezeichnet mit VRED

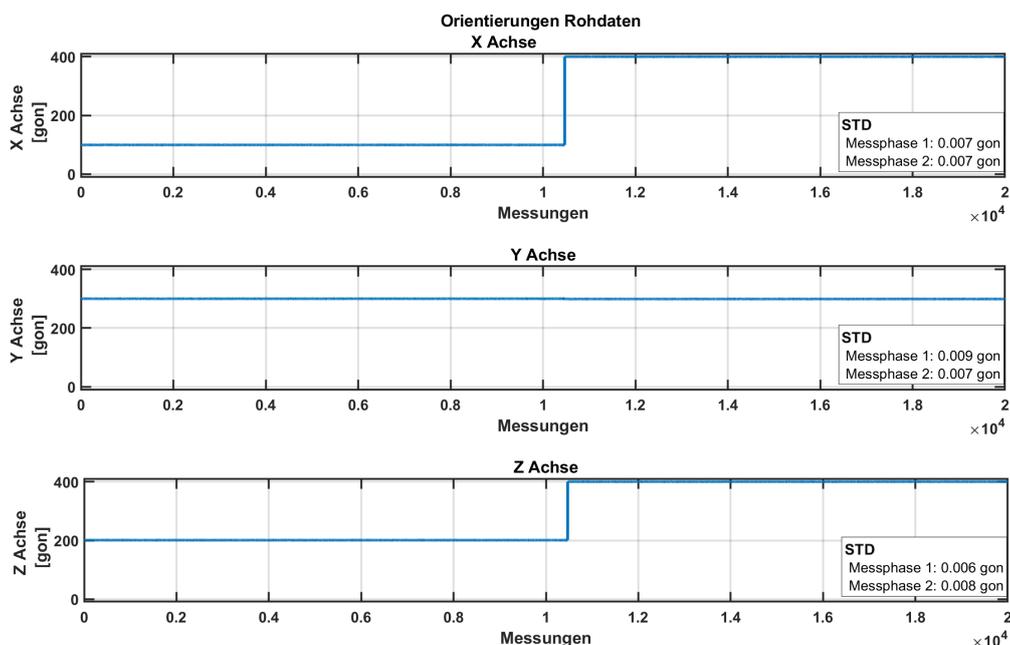


Abbildung 4.99: Orientierung bei erzwungenem Orientierungssprung - aufgezeichnet mit VRED

5 Limitation der Untersuchungen

Da die Untersuchungen im Zuge einer Masterarbeit stattfanden, musste auch der zeitliche Rahmen beachtet werden. Aus diesem Grund konnte das System nicht mit allen Einzelheiten untersucht werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass bei allen Untersuchungen lediglich statische Messungen durchgeführt wurden, das dynamische Messverhalten wurde nicht beleuchtet. Aufgrund der Tatsache, dass alle Komponenten über eine IMU verfügen, ist davon auszugehen, dass das dynamische Verhalten nicht mit dem statischen Messverhalten übereinstimmt.

Ein weiterer Punkt, den es zu beachten gilt, ist, dass die Ergebnisse nur für die getesteten Softwareversionen (Abschnitt 4.2.4.1) gelten. Aufgrund der schnellen Entwicklung der Software kann davon ausgegangen werden, dass ein Teil der aufgedeckten Probleme zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Arbeit mitunter bereits behoben wurden.

6 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Aufgrund der hohen Anzahl an verschiedenen Untersuchungen im Kapitel 4 fällt es schwer, diese zueinander in Relation zu setzen und die Größenordnungen der Auswirkungen zu vergleichen. Um dies zu erleichtern, werden die wichtigsten Erkenntnisse im Folgenden noch einmal kompakt zusammengefasst.

Wie in Abschnitt 4.6 erläutert wurde, erfolgt die Verknüpfung der VR mit der realen Welt über das Festlegen eines Spielbereiches. Die Ausrichtung der X- und Z-Achsen erfolgt, je nach Variante, über die gewählten Spielfeldgrenzen bzw. über die Position und Ausrichtung der Brille beim RoomSetup. Der Bezug zur realen Bodenebene, und dadurch die Ausrichtung der Y-Achse, wird von SteamVR vermutlich mittels der eingebauten IMU der Devices hergestellt. In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die von Niehorster et al. (2017) für das Vorgängermodell (HTC Vive) bestimmte Verkipfung der Bodenebene auch in der aktuellen Version des Systems vorhanden ist (Abschnitt 4.6.1.1).

Die Untersuchungen des Messbereichs eines Lighthouses haben ergeben, dass Messungen in einem Abstand von 0,5 bis 7 m zum Lighthouse möglich sind (Abschnitt 4.3.2.2 und Abschnitt 4.3.2.3). Der horizontale Öffnungswinkel der Lighthouses wird vom Hersteller mit $\pm 60^\circ$ angegeben. Die Messungen in Abschnitt 4.3.2.1 haben gezeigt, dass der Messbereich mit $\pm 75^\circ$ sogar größer ist als angegeben. Der vertikale Öffnungswinkel wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.

Ein großer Vorteil des HTC Vive Pro Systems ist die Erweiterung des Nutzungsbereichs durch die Verwendung zusätzlicher Lighthouses. In den verschiedenen Versuchen wurde erkannt, dass genau diese modulare Erweiterung des Systems gleichzeitig auch die größte Problemquelle darstellt. Es hat sich gezeigt, dass das Hauptproblem des Systems die Verknüpfung der Lighthouses untereinander ist. Wie in Abschnitt 4.6.2 beschrieben ist, kommt es bei Verwendung mehrerer Lighthouses zu Koordinatensprüngen von mehreren Zentimetern. Die Ursache für diese Sprünge liegt vermutlich im Berechnungsansatz der Lighthousepositionen und Orientierungen. Es scheint, dass die Berechnung des Koordinatensystems und somit in weiterer Folge aller Device- und Lighthousekoordinaten von einem Lighthouse ausgeht. Wie dieses Master-Lighthouse bestimmt wird, konnte nicht ergründet werden. Ausgehend von diesem Master-Lighthouse werden über das HMD die Koordinaten der restlichen Lighthouses bestimmt. Die Qualität dieser Verknüpfung ist dadurch sehr stark von der Qualität der Messungen der Lighthouses zum HMD abhängig. Wie sich bei den devicebezogenen Untersuchungen in den Abschnitten 4.3 und 4.4 gezeigt hat, werden diese Messungen von einigen Faktoren beeinflusst und es ergeben sich dadurch Spannungen zwischen den Koordinaten der Lighthouses. Der vom Hersteller gewählte Berechnungsansatz lässt sich vermutlich auf das Ziel einer hohen Verfügbarkeit zurückführen. Der Vorteil hierbei ist, dass nachdem ein Lighthouse bewegt wurde, sofort die neuen Koordinaten dieses Lighthouses bestimmt werden können und kein neues RoomSetup ausgeführt werden muss. Es wird in der Berechnung offensichtlich nicht davon ausgegangen, dass die Lighthouses stabil positioniert sind. Die Untersuchungen zur Bestimmung des Koordinatensystems in Abschnitt 4.6.3 haben auch gezeigt, dass für die Bestimmung der Lighthouses nur die Daten von jeweils zwei Lighthouses kombiniert werden. Es wird kein Ausgleich des gesamten Koordinatensystems durchgeführt, der Ansatz gleicht eher dem eines Polygonzugs ohne Abschluss [Gruber und Joeckel, 2017].

Bei der Untersuchung des Messrauschens der einzelnen Devicetypen (Abschnitt 4.3.1) wurde deutlich die Hypothese aus Abschnitt 3.3 bestätigt, dass die Richtung vom Lighthouse zum Device mit einer höheren Genauigkeit bestimmt werden kann als die Distanz. Bei den statischen Messungen zeigte sich zwischen den Standardabweichungen der Distanz- und der Richtungsmessung ein Faktor von 5-10. Die Größenordnung des Messrauschens unterscheidet sich auch zwischen den Devicetypen und hängt stark von der relativen Lage des Devices zum Lighthouse ab. Beim direkten Vergleich

des Messrauschens der Devices in Abschnitt 4.3.1.4 hat sich gezeigt, dass das HMD das geringste Messrauschen aufweist. Das Messrauschen des HMD bei einem Abstand von 2 m zum Lighthouse und einer Positionierung im zentralen Messbereich hat eine Standardabweichung von 0,25 mm in Richtung des Lighthouses und 0,05 mm quer dazu. Beim Controller zeigen sich vor allem bei schlechterer Lage (Positionierung 52° seitlich vom Zentralbereich des Lighthouses) etwas größere Abweichungen als bei der Brille. Der Tracker schneidet in allen Konfigurationen am schlechtesten ab. Je nach Lage liegen die Standardabweichungen des Trackers zwischen 0,35 mm und 0,7 mm in Richtung des Lighthouses und 0,05 mm quer dazu. Diese Reihung dürfte mit der Anzahl der vorhandenen Dioden und den Abständen der sichtbaren Dioden zueinander zusammenhängen.

Werden anstelle von einem Lighthouse zwei Lighthouses zur Positions- und Orientierungsbestimmung der Devices verwendet, kommt es unter gewissen Konfigurationen zu einer Veränderung des Messrauschens (Abschnitt 4.3.1.2). Anhand der nahezu isotropen Rauschmuster wird davon ausgegangen, dass beide Lighthouses in die Berechnung miteinbezogen werden. Die Standardabweichungen verringern sich im Vergleich zur Messung mit einem Lighthouse deutlich.

Neben dem Messrauschen der statischen Position wurden auch systematische Abweichungen untersucht. Es konnte mittels der Messung am Horizontalkomparator gezeigt werden, dass die Distanzmessungen vom Lighthouse zum Tracker mit einem Maßstabsfaktor behaftet sind (Abschnitt 4.3.4). Es hat sich gezeigt, dass die aus den Koordinaten berechneten Distanzen im Verhältnis zur Referenzdistanz immer kürzer werden, umso größer die Entfernung zum Lighthouse ist. Dieser Test wurde mit drei unterschiedlichen Trackern durchgeführt und die Systematik konnte mit allen bestätigt werden. Beim Versuch *Komparator Distanz 1* kam es beim Tracker TU auf einer Strecke von 5,5 m um eine Verkürzung von 24,6 mm.

Außerdem wurden auch die Einflüsse der Ausrichtung der Devices zum Lighthouse betrachtet. Bei den Rotationstests (Abschnitt 4.3.5) von Controller, Tracker und HMD fiel auf, dass es systematische Abweichungen gibt, welche deutlich größer sind als das Messrauschen. Für den Tracker wurde gezeigt, dass die Spannweite der Abweichungen mit dem Abstand zum Lighthouse zusammenhängt. Wie in Tabelle 4.4 aufgelistet ist, betragen die Spannweiten der Abweichungen zwischen 7,6 mm (Distanz zum Lighthouse: 0,94 m) und 33 mm (Distanz zum Lighthouse: 3,52 m). Auffällig ist auch, dass die rotationsabhängigen Abweichungen aller Devices, gleich wie das Messrauschen, eine elliptische Form aufweisen und in Richtung des Lighthouses ausgerichtet sind.

In den Versuchen mit dem HMD konnte zusätzlich gezeigt werden, dass die Wiederholbarkeit einer Positionsmessung von der zurückgelegten Trajektorie abhängt. Die Abweichungen zwischen den einzelnen Rotationen von Tracker (Abschnitt 4.3.5.1) und Controller (Abschnitt 4.3.5.5) haben eine Größenordnung von ± 1 mm. Im Unterschied zu Tracker und Controller konnte das HMD aufgrund der Bauform und der notwendigen Kabelverbindung nicht drei Umdrehungen in dieselbe Richtung rotiert werden (Abschnitt 4.3.5.6). Das HMD wurde deshalb abwechselnd in und gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Die Abweichungen zwischen den Rotationen mit gleicher Drehrichtung sind vergleichbar mit denen der anderen Devicetypen. Beim Vergleich der Rotationen mit unterschiedlichen Drehrichtungen traten hingegen im Bereich mit schlechter Sichtbarkeit deutlich höhere Differenzen auf. Diese Beobachtung konnte auch bei den Messungen *Komparator Distanz 2* (Abschnitt 4.3.2.3) gezeigt werden. Die Differenzen zwischen Hin- und Rückmessung eines Zyklus waren deutlich größer als die Differenzen der jeweiligen Hin- und Rückmessungen der Zyklen zueinander. Im Zuge der Rotationstests wurden auch die Orientierungswerte von Controller und Tracker untersucht. Bei diesen Devicetypen war es möglich, die Komponenten horizontal zu drehen und somit die Drehung in einer Achse abzubilden. Bei der Analyse der Daten des Controllers (Abschnitt 4.4.1) konnte festgestellt werden, dass die Abweichungen zur Referenz die Größenordnung von $\pm 1,5$ gon aufweisen. Die Standardabweichungen der Orientierungswerte betragen auf allen Achsen unter 0,2 gon.

Beim Tracker kam es im Zuge der Untersuchung der Orientierungswerte zu Auffälligkeiten. Es konnte gezeigt werden, dass es zu einer sprunghaften Änderung der Orientierung und Position des Trackers kommen kann (Abschnitt 4.4.2). Daraus ergaben sich zwei Fälle, wie die unterschiedlichen Ergebnisse in den Untersuchungen zeigten (Abschnitt 4.4.2). Der Wechsel zwischen den beiden Fällen konnte mit dem Ausfall bzw. dem Abschalten der Controller in Verbindung gebracht werden. Auffällig in diesem Zusammenhang ist, dass die Präzision der Orientierungsdaten der beiden Fälle stark voneinander abweicht und der Sprung auch in der visuellen Anzeige des Trackers in der VR ersichtlich ist. Dieses eindeutig fehlerhafte Verhalten des Trackers konnte auch mit der Aufzeichnung der Daten in VRED reproduziert werden (Abschnitt 4.7). Allerdings unterscheidet sich hier die Präzision der Messungen zwischen den beiden Fällen nicht. Auch die Untersuchungen zu den systematischen Abweichungen und dem Messrauschen wurden mit VRED verifiziert und es wurden keine Unterschiede entdeckt.

Abschließend kann gesagt werden, dass sich die in Abschnitt 3.3 vermuteten Unterschiede in der Präzision der Richtung und der Distanzmessung bestätigt haben. Bei den Untersuchungen hat sich aber gezeigt, dass es größere systematische Abweichungen gibt, welche das Messrauschen deutlich übersteigen. Bei der Verwendung von mehreren Lighthouses hat sich außerdem gezeigt, dass das gesamte Koordinatensystem sehr instabil ist und es zu Orientierungs- und Koordinatensprüngen kommen kann.

6.1 Anwendbarkeit des Systems als Positionierungssystem mit Fokus auf Genauigkeit und Stabilität

Im Abschnitt 1.8 wurde als ein Anwendungsbeispiel für das HTC Vive Pro System die Sitzkiste eingeführt. Es wurde angenommen, dass das System einerseits in der Lage ist, die Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen, die durch die Verknüpfung der realen Bestandteile des Prototypen mit der VR entstehen, andererseits sollte es durch die modulare Erweiterung des Systems mit zusätzlichen Lighthouses auch möglich sein, Fahrzeuge von außen und von innen zu betrachten, ohne eine Abschaltung des HMD aufgrund fehlender optischer Signale zu riskieren.

Im Unterschied zu den Anwendungen im Gaming-Bereich liegt hierbei die Priorität nicht auf der hohen Verfügbarkeit des Systems, sondern auch auf der Genauigkeit und Stabilität der Positionierung. Vor allem durch die Verknüpfung von stationärer, realer Hardware (Sitzkiste) mit der VR ändern sich die Anforderungen an das System grundlegend. Denn nun muss nicht nur die relative Position der Komponenten zueinander stimmen, sondern es sollte auch der absolute Bezug im Raum stabil bleiben. Ist dies nicht der Fall, ändert sich die Position der fix installierten Sitzkiste in der VR, obwohl diese sich in der Realität nicht bewegen kann. Dies löst beim Benutzer Verwirrung aus und stört die Immersion in die VR.

Die Untersuchungen, welche im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass das derzeitige System für diesen Anwendungsbereich noch nicht perfekt funktioniert, da es zu Sprüngen im Bereich mehrerer Zentimeter durch die Lighthouses kommen kann und es systematische Abweichungen gibt, die deutlich größer sind als das Messrauschen.

Es gibt aber einige Möglichkeiten um die Qualität zu verbessern:

- Wenn möglich, 1 Lighthouse verwenden
Als größte Fehlerquelle wurden der Wechsel des Bezugslighthouses bzw. die Sprünge der Lighthousekoordinaten bestimmt. Um diese Sprünge in der Größenordnung von mehreren Zentimetern zu vermeiden, sollte bei Anwendungen, welche eine höhere Genauigkeit erfordern, nur ein Lighthouse verwendet werden. Dadurch reduzieren sich die Fehlerquellen auf die systematischen Fehler und das Messrauschen.

- Konstante Ausrichtung der Komponenten
Um die systematischen Abweichungen der Komponenten zu minimieren, kann versucht werden, diese immer gleich zum Lighthouse auszurichten. Dadurch sollte zumindest relativ zwischen diesen Positionen eine Genauigkeit in der Größenordnung kleiner 10 mm erreicht werden können.
- Vollständige Rotation des Trackers während der Messung
Um die rotationsabhängigen Abweichungen zu eliminieren, sollte der Tracker für Messungen, bei denen die Genauigkeit absolut im Raum wichtig ist, rotiert werden und das Mittel dieser Rotation als Ergebnis herangezogen werden. Ob für dieses Verfahren eine handgeführte Rotation ausreicht wurde nicht untersucht.
- Einbinden statischer Komponenten über mehrere Messpunkte
Um die Verbindung zwischen der VR und statischen Objekten in der realen Welt herzustellen, sollte die Orientierungsmessung nicht verwendet werden, da bei dieser Probleme festgestellt wurden. Es ist die Messung mehrerer Punkte (Rotation zur Elimination der systematischen Abweichungen) und eine anschließende Transformation zu bevorzugen.

Werden diese Punkte beachtet, sollte eine deutliche Verbesserung möglich sein. Dennoch wird das Potential des Systems dadurch nicht vollkommen ausgeschöpft.

6.2 Entwicklungspotential des Systems

In der Gesamtheit der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Hardware das Potential hat, deutlich höhere Genauigkeiten zu erzielen als derzeit mit dem Gesamtsystem möglich ist. Um dies zu erreichen, würde es aber einige Änderungen in der Positionierungssoftware benötigen.

Wie schon zuvor beschrieben, sind die vom Betrag her größten Fehler durch die Instabilität der Lighthouses bedingt. Diese könnte durch einen geänderten Ansatz verbessert werden. Aus geodätischer Sicht wäre es sinnvoll, alle Lighthouses, welche verwendet werden sollen, bereits beim Initialisierungsvorgang einzubinden. Dadurch könnten die Daten aller Lighthouses in einem Ausgleich verknüpft werden. Im Zuge des Ausgleichs wäre es, bei einer gewissen Überbestimmung, möglich, schlechte Messungen aufzudecken und eine Qualität der Lighthousepositionen anzugeben. Geht man von einer fixen Installation in einem VR-Raum aus, wäre es auch denkbar, die Positionen der Lighthouses mit externen Mitteln, z.B. einer Totalstation, einzumessen und diese Informationen in den Ausgleich mit einfließen zu lassen.

Wenn man nach dieser Initialisierungsphase davon ausgeht, dass sich die Lighthousepositionen und Orientierungen nicht mehr ändern, könnten auch alle von einer Komponente aus sichtbaren Lighthouses für die Bestimmung dieser Komponenten verwendet werden. Dass die Hardware in der Lage ist, Messungen von zwei Lighthouses gleichzeitig zu empfangen, wurde in Abschnitt 4.3.1 gezeigt. Da aber die rotationsabhängigen Abweichungen weiterhin vorhanden und auf ein Lighthouse ausgerichtet sind, ist davon auszugehen, dass diese Daten nicht für die Berechnung der absoluten Position einbezogen werden (Abschnitt 4.3.5.4). Mit der Verwendung mehrerer Lighthouses und einer sinnvollen Positionierung dieser könnten die rotationsabhängigen Abweichungen deutlich minimiert werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Messungen eines Lighthouses zu den einzelnen Komponenten zu verbessern, wäre außerdem eine Kalibrierung der Komponenten, um fertigungstechnische Differenzen zwischen Rechenmodell und Hardware zu minimieren.

7 Fazit und Ausblick

Wie bereits zuvor angemerkt wurde, weist die Hardware des Systems ein enormes Potential auf, welches über die Anforderungen der Gaming-Anwendungen hinausgeht. Unter gewissen Voraussetzungen und dem Beachten einiger Randbedingungen sollte es aber auch mit dem aktuellen System möglich sein, relative Messungen im Genauigkeitsbereich von 10 mm durchzuführen. Da das Hauptproblem des aktuellen Systems die Verknüpfung der Lighthouses untereinander ist, hat die Software noch sehr großes Entwicklungspotential. Aus derzeitiger Sicht können diese Verbesserungen leider nur vom Hersteller selbst eingeführt werden, da auf die Rohdaten der Messungen zwischen Lighthouse und den Komponenten nicht zugegriffen werden kann. Würde diese Schnittstelle freigegeben werden, wäre es möglich, nicht nur Anwendungen auf Basis der Komponentenstreams zu erstellen, sondern auch das Positionierungssystem auf die Anforderungen der jeweiligen Anwendung anzupassen. Dadurch könnte man den mögliche Nutzungsbereich des Systems stark erweitern und vermutlich Messungen in einer Größenordnung von 1 mm möglich machen.

Literaturverzeichnis

- ANTVR. (2019). Inside-Out_vs._Outside-In. Zugriff 24. September 2019 unter http://www.antvr.com/en/ar_m1.do
- Aukstakalins, S. (2017). AR / VR Science Note 005: Causes and Susceptibility to Visually-Induced Motion Sickness. Blog. Zugriff 25. September 2019 unter <http://practicalar.com/2017/01/25/ar-vr-science-note-005-causes-and-susceptibility-to-visually-induced-motion-sickness/>
- Barnard, D. (2019). Degrees of Freedom (DoF): 3-DoF vs 6-DoF for VR Headset Selection. Zugriff 25. September 2019 unter <https://virtualspeech.com/blog/degrees-of-freedom-vr>
- Bauer, P., Jost, S. & Lienhart, W. (2020). Beurteilung der Eignung eines VR-Systems als 3D Koordinatenmesssystem. In T. Wunderlich (Hrsg.), *Ingenieurvermessung 20* (S. 15–28). Deutschland: Wichmann Verlag.
- Bezmalinovic, T. (2018). SteamVR: Erste Entwickler erhalten neue Trackingboxen. Zugriff 7. Oktober 2019 unter <https://mixed.de/steamvr-erste-entwickler-erhalten-neue-trackingboxen/>
- Borges, M., Symington, A., Coltin, B., Smith, T. & Ventura, R. (2018). HTC Vive: Analysis and Accuracy Improvement. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (S. 2610–2615). Madrid: IEEE. doi:10.1109/IROS.2018.8593707
- Brill, M. (2009). *Virtuelle Realität*. Informatik im Fokus. OCLC: 316220892. Berlin: Springer.
- Brockhaus. (2019). virtuelle Realität. Zugriff 13. September 2019 unter <http://brockhaus.de/ecs/enzy/article/virtuelle-realit%C3%A4t>
- Brooks, F. (1999). What's real about virtual reality? *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19(6), 16–27. doi:10.1109/38.799723
- Carbotte, K. (2019). Oculus Rift S Review: First-Gen VR Gets a Reboot. Zugriff 25. September 2019 unter <https://www.tomshardware.com/reviews/oculus-rift-s-vr-headset,6148.html>
- Cline, E. (2011). *Ready player one* (1st ed). New York: Crown Publishers.
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V. & Hart, J. C. (1992). The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, 35(6), 64–72. doi:10.1145/129888.129892
- De Angelo, J. (2000). "The Link Flight Trainer". Zugriff 13. September 2019 unter <https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/resourcefiles/aboutasme/who%20we%20are/engineering%20history/landmarks/210-link-c-3-flight-trainer.pdf>
- Deppmeyer, K. (2007). Der Leuchtturm von Pharos - ein spätes Weltwunder. *Frankfurter elektronische Rundschau zur Altertumskunde*. Zugriff 8. Oktober 2019 unter <https://web.archive.org/web/20070929180305/http://www.freak-farm.de/fera/ausgabe3/Deppmeyer.pdf>
- Deumlich, F. & Staiger, R. (2002). *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik* (9., völlig neu bearb. und erw. Aufl). OCLC: 50459326. Heidelberg: Wichmann.
- FOCUS, O. (2017). Der Geister-Golf. Zugriff 27. September 2019 unter https://www.focus.de/auto/news/virtuelle-autoentwicklung-von-vw-der-geister-golf_id.7650291.html
- Glon, R. (2019). Magna Using Virtual Reality Technology to Develop Components. Zugriff 27. September 2019 unter <https://www.digitaltrends.com/cars/magna-using-virtual-reality-technology-to-develop-components/>
- Google. (2019). Google Cardboard bedrucken für Ihre Virtual Reality Marketing. Zugriff 17. September 2019 unter <https://mrcardboard.eu/de/individuell-anfertigen-google-cardboard-fuer-ihre-virtual-reality-marketing/>
- Gruber, F. J. & Joeckel, R. (2017). *Formelsammlung für das Vermessungswesen* (18. Auflage). OCLC: 958066021. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Heilig, M. (1962). *Sensorama Simulator*. 3,050,870. Long Beach, N.Y. Zugriff 13. September 2019 unter <http://www.mortonheilig.com/SensoramaPatent.pdf>

- Helfrick, A. D. (2015). *Principles of avionics*. OCLC: 1120433157.
- Hennes, M. & Ingensand, H. (2000). Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung. In *Beitrag zum XIII. Kurs für Ingenieurvermessung, München, 13.-17.3.2000* (S. 12).
- Heunecke, O., Kuhlmann, H., Welsch, W. & Welsch, W. M. (Hrsg.). (2013). *Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen* (2., neu bearb. und erw. Aufl). Handbuch Ingenieurgeodäsie. OCLC: 254721227. Berlin: Wichmann.
- Hofmann-Wellenhof, B., Legat, K. & Wieser, M. (2003). *Navigation: principles of positioning and guidance*. OCLC: ocm52058434. Wien ; New York: Springer.
- HTC. (2018). HTC VIVE Tracker (2018) Developer Guidelines Ver. 1.4. Zugriff 2. Oktober 2019 unter <https://developer.vive.com/resources/knowledgebase/vive-tracker-developer-guidelines/>
- Hudson, T. (2017). HTC Vive Lighthouse. Zugriff 1. Oktober 2018 unter <https://trmm.net/Lighthouse>
- IGMS. (2019). IGMS - Laboratory. Zugriff 21. Oktober 2019 unter <https://www.tugraz.at/institute/igms/laboratory/description/>
- jdavidberger. (2019). Lighthouse v2 polynomials and freq per mode. Zugriff 8. Oktober 2019 unter <https://gist.github.com/jdavidberger/e3f93f485739f4d35dda57b08439bdd7>
- Knapp, M. (2019). Valve Index vs HTC Vive Pro vs Oculus Rift S: the VR headset showdown. Zugriff 25. September 2019 unter <https://www.techradar.com/news/valve-index-vs-htc-vive-pro-vs-oculus-rift-s-the-vr-headset-showdown>
- Kreylos, O. (2016). Lighthouse tracking examined. Zugriff 1. Oktober 2018 unter <http://doc-ok.org/?p=1478>
- Lackner, S. & Lienhart, W. (2016). Impact of Prism Type and Prism Orientation on the Accuracy of Automated Total Station Measurements, 8.
- Lang, B. (2017). Latest HTC Vives Are Shipping with Tweaked Base Stations, Redesigned Packaging. Zugriff 4. Oktober 2019 unter <https://www.roadtovr.com/latest-vive-shipping-with-tweaked-base-stations-redesigned-packaging/>
- Leica-Geosystems. (1998). Leica User Manual TPS - System 1000. Zugriff 11. November 2019 unter https://www.vermessen.de/tl_files/surveyors/download/handbuch/Leica/tps1000_system_usermanual.en.pdf
- Lira, I. (2002). *Evaluating the measurement uncertainty fundamentals and practical guidance*. OCLC: 929288033. Bristol, U.K.; Philadelphia, Pa.: Institute of Physics Pub. Zugriff 6. Januar 2020 unter <http://0-marc.crcnetbase.com.fama.us.es/isbn/9781420034363>
- Luckett, E. (2018). *A Quantitative Evaluation of the HTC Vive for Virtual Reality Research* (Diss., University of Mississippi, Oxford). Zugriff 13. November 2019 unter <https://core.ac.uk/download/pdf/159487877.pdf#cite.trackingurvey>
- Macheiner, K. (2010). *Development of a fiber optic tiltmeter for static and kinematic applications*. Engineering Geodesy - TU Graz. OCLC: 655766448. Aachen: Shaker.
- Mas, A. (2012). *Use of driving simulators for advanced driver assistance Systems evaluation in emergency situations* (Theses, Arts et Métiers ParisTech, Paris). Zugriff unter <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00714217>
- Meierling. (2014). RAK - Motorisierter Drehtisch. PhysicalObject. Zugriff 13. November 2019 unter <http://positioniertechnik-meierling.de/produkte/rak-motorisierter-drehtisch>
- Milchrahm, S. (2014). *Bestimmung der Linearität der 30 m Komparatorbank im Messlabor*. (Bakalaureatsarbeit, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS), Technische Universität Graz., Graz).
- Möser, M. (Hrsg.). (2012). *Grundlagen* (4., völlig neu bearb. Aufl). Handbuch Ingenieurgeodäsie. OCLC: 838057916. Berlin: Wichmann.

- nairol. (2017). LighthouseRedox. Zugriff 4. Oktober 2019 unter <https://github.com/nairol/LighthouseRedox/blob/master/docs/Light%20Emissions.md>
- Niehorster, D. C., Li, L. & Lappe, M. (2017). The Accuracy and Precision of Position and Orientation Tracking in the HTC Vive Virtual Reality System for Scientific Research. *i-Perception*, 8(3), 204166951770820. doi:10.1177/2041669517708205
- Niemeier, W. (2008). *Ausgleichsrechnung: statistische Auswertemethoden* (2., überarb. und erw. Aufl.). de Gruyter Lehrbuch. OCLC: 255730650. Berlin: de Gruyter.
- Oberzaucher, M. (2003). *Kontinuierliche Neigungsmessungen entlang einer Bahntrasse*. (Diplomarbeit, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS), Technische Universität Graz.).
- Oculus. (2019). Oculus Rift S. Zugriff 25. September 2019 unter <https://www.oculus.com/rift-s>
- Panetta, K. (2017). Enterprises should explain the business potential of blockchain, artificial intelligence and augmented reality. Zugriff 16. September 2019 unter <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/>
- Panetta, K. (2018). Widespread artificial intelligence, biohacking, new platforms and immersive experiences dominate this year's Gartner Hype Cycle. Zugriff 16. September 2019 unter <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/>
- Porsche. (2019). Digitalisierung in der Fahrzeugentwicklung. Zugriff 30. September 2019 unter <https://newsroom.porsche.com/de/2019/digital/porsche-digitalisierung-fahrzeugentwicklung-beispiele-16981.html>
- r2x0t. (2018). Let's try figuring out the data stream. · Issue #1 · cnlohr/esptracker. Zugriff 7. Oktober 2019 unter <https://github.com/cnlohr/esptracker/issues/1#issuecomment-410683665>
- Rolland, J. P., Ballot, Y. & Goon, A. A. (2001). (PDF) A survey of tracking technology for virtual environments. *ResearchGate*. Zugriff 17. September 2019 unter https://www.researchgate.net/publication/242415577_A_survey_of_tracking_technology_for_virtual_environments
- Schulte, G. & Löhr, W. (1941). *Markscheidekunde für Bergschulen und für den praktischen Gebrauch* (Zweite verbesserte Auflage). Google-Books-ID: tN_xBgAAQBAJ. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Sigl, R. (1977). *Ebene und sphärische Trigonometrie: mit Anwendungen auf Kartographie, Geodäsie und Astronomie*. Sammlung Wichmann, n.F. : Buchreihe ; Bd. 9. Karlsruhe: Wichmann.
- snakebyte. (2019). snakebyte — vr:stand. Zugriff 13. November 2019 unter <https://mysnakebyte.com/produkte/produktseiten/vrstand.html>
- Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. In *AFIPS '68 (Fall, part I): Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I* (Bd. 33). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. Zugriff 13. September 2019 unter <http://cacs.usc.edu/education/cs653/Sutherland-HeadmountedDisplay-AFIPS68.pdf>
- Testo. (2019). Messunsicherheitsfibel. Zugriff 4. November 2019 unter http://download.testotis.de/files/at/fibeln/at_messunsicherheitsbestimmung_nach_gum.pdf
- Titterton, D. & Weston, J. (2004). *Strapdown Inertial Navigation Technology*. The Institution of Engineering: IET. doi:10.1049/PBRA017E
- Toghill, J. (2003). *Traditional and electronic navigation: an introduction to methods and equipment*. OCLC: 249205888. London: New Holland.
- Triad, S., Inc. (2016). TS4231 Light to Digital Converter Product Datasheet. Zugriff 2. Oktober 2019 unter <https://www.triadsemi.com/wp-content/uploads/2017/06/TS4231-Datasheet.pdf>
- Van Krevelen, R. (2007). *Augmented Reality: Technologies, Applications, and Limitations*. doi:10.13140/RG.2.1.1874.7929
- Vive. (2019). VIVE Pro — The professional-grade VR headset. Zugriff 1. Oktober 2019 unter <https://www.vive.com/us/product/vive-pro/>

- Vive. (2020). VIVE Pro Starter Kit — Das VR-Headset für professionelle Anwender. Zugriff 26. September 2019 unter <https://www.vive.com/de/product/vive-pro-full-kit/>
- Wang, J.-F., Azuma, R. T., Bishop, G., Chi, V., Eyles, J. & Fuchs, H. (1990). Tracking a head-mounted display in a room-sized environment with head-mounted cameras. In R. J. Lewandowski (Hrsg.) (S. 47–57). Orlando, FL. doi:10.1117/12.20954
- Yates, A. (2016). Alan Yates on the Impossible Task of Making Valve’s VR Work. Zugriff 1. Oktober 2019 unter <https://www.youtube.com/watch?v=75ZytcYANTA>
- Zobel, B., Werning, S., Metzger, D. & Thomas, O. (2018). Augmented und Virtual Reality: Stand der Technik, Nutzenpotenziale und Einsatzgebiete. In C. de Witt & C. Gloerfeld (Hrsg.), *Handbuch Mobile Learning* (S. 123–140). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-19123-8_7
- Zogg, H.-M., Lienhart, W. & Nindl, D. (2009). Leica TS30 White Paper. Zugriff 3. Januar 2020 unter http://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/general/white-tech-paper/whitepaper_ts30_de.pdf

Abbildungsverzeichnis

1.1	Link Flight Trainer [De Angelo, 2000]	1
1.2	Sensorama [Mas, 2012]	2
1.3	HMD von Sutherland (Damoklesschwert) [Van Krevelen, 2007]	3
1.4	Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies 2017 [Panetta, 2017]	3
1.5	3 DoF vs. 6 DoF angelehnt an Barnard (2019)	5
1.6	Inside-Out vs. Outside-In [ANTVR, 2019]	6
1.7	Google Cardboard [Google, 2019]	7
1.8	Oculus Rift S [Oculus, 2019]	8
1.9	HTC Vive Pro Starter Kit [Vive, 2019]	8
1.10	Visualisierung eines Prototypen [FOCUS, 2017]	9
1.11	Sitzkiste [Porsche, 2019]	10
2.1	Geodätisches Messsystem angelehnt an Hennes und Ingensand (2000)	12
2.2	Abweichungen in der Distanzmessung zu einem MultiTrack 1000 target bei unterschiedlichen Ausrichtungen und Verwendung von 3 verschiedenen Totalstationen. [Lackner und Lienhart, 2016]	14
2.3	Genauigkeit und Präzision [Testo, 2019]	15
2.4	Vergleich kartesische und Polarkoordinaten, angelehnt an Möser (2012)	16
2.5	Koordinatensystemtransformation angelehnt an Niemeier (2008)	16
2.6	Funktionsprinzip VOR	17
3.1	Datenübertragung zwischen den Komponenten	18
3.2	HTC Vive Pro HMD [Vive, 2020]	19
3.3	HTC Vive Pro Controller [Vive, 2020]	19
3.4	Tracker Vergleich original und mit geöffnetem Gehäuse [Bauer, Jost und Lienhart, 2020]	20
3.5	Tracker Achsendefinition [HTC, 2018]	20
3.6	Vergleich originales und geöffnetes Lighthouse der 1. Generation [Lang, 2017]	22
3.7	Abfolge der Signale der Lighthouses 1. Generation	23
3.8	Lighthouse der 2. Generation mit geöffneter Front [Bauer, Jost und Lienhart, 2020]	23
3.9	Vergleich der Rotationszylinder und Lasersignale der Lighthousegenerationen, angelehnt an Bezmalinovic (2018)	24
3.10	Ebenen der Rotationsemitter beim Lighthouse der 1. Generation	25
3.11	Berechnungsprinzip des Richtungsvektors vom Lighthouse zu einem Rezeptor	26
3.12	Skizze des geometrischen Ansatzes zur Bestimmung der Distanz	27
3.13	vereinfachte Darstellung des Geometrischen Ansatzes	30
4.1	Übersicht des Messlabors am IGMS, angelehnt an [IGMS, 2019]	33
4.2	Horizontalkomparator	33
4.3	Leica TM1100 - Umbau IGMS inkl. Adapterplatte	34
4.4	Verschiedene Adapter zur Stabilisierung des VR-Trackers	35
4.5	Adapter Controller	36
4.6	Verschiedene Adapter zur Stabilisierung des HMD	36
4.7	Drehtisch mit HMD	37
4.8	Versuchsaufbau Messrauschen HMD und Tracker	40
4.9	Messrauschen HMD und Tracker - Abweichung zum Mittelwert	41
4.10	Abweichung des Messrauschens in der Lage (X-Z-Ebene)	41
4.11	Messrauschen HMD und Tracker - Abweichung zum Mittelwert bei Signalunterbrechung	42

4.12	Abweichung des Messrauschens in der Lage in Referenz zur Messanordnung	43
4.13	Versuchsaufbau Messrauschen im Raster	44
4.14	Ausrichtung Messrauschen im Raster bei zwei Lighthouses	44
4.15	Vergleich des statischen Messrauschens von HMD, Controller und TR	45
4.16	Vergleich des Messrauschens der VR-Komponenten bei Sichtverbindung zu einem Lighthouse	46
4.17	Messaufbau - Bestimmung des Öffnungswinkels	47
4.18	Messrauschen in Lage bei seitlichem Verfahren, Abstand zum LH 4 m, in Referenz zur Messanordnung	48
4.19	Abweichungen zur Referenz im Vergleich zur Abstand zur Nullposition, Abstand zum Lighthouse und Winkel zum Lighthouse (Abstand LH zur Komparatorbank 4 m)	49
4.20	Abweichungen zur Referenz in Bezug zum Abstand zur Nullposition, Abstand zum Lighthouse und Winkel zum Lighthouse (Abstand LH zur Komparatorbank 1 m) . .	49
4.21	Abweichung zur Referenz i Bezug zum Winkel zum Lighthouse (vergrößert)	50
4.22	Standardabweichung der statischen Messungen in Bezug zum Winkel zum Lighthouse	50
4.23	Messaufbau Bestimmung des maximalen Abstands zwischen Lighthouse und Device .	50
4.24	Abweichung zwischen Referenzdistanz und Trackerdistanz bezogen auf den Start- punkt der Messung	51
4.25	Standardabweichung der statischen Messungen in Bezug auf den Abstand zum Lighthou- se	51
4.26	Standardabweichung der statischen Messungen in Bezug auf den Abstand zum Lighthou- se (vergrößert)	51
4.27	Messaufbau Bestimmung des Maßstabs	52
4.28	Vergleich der Messbereichsüberprüfung mit einer Startdistanz von 0,45 m	53
4.29	Differenz zwischen Hin- und Rückmessung für den Tracker TU - Versuchsaufbau Komparator Distanz 1	54
4.30	Differenz zwischen Hin- und Rückmessung für die Tracker TU, M1 und M2 - Ver- suchsaufbau Komparator Distanz 2	55
4.31	Differenz zwischen Zyklus 2 und 3, getrennt für Hin- und Rückmessung, für die Tracker TU, M1 und M2 - Versuchsaufbau Komparator Distanz 2	55
4.32	Abweichungen zur Referenz des Trackers TU - Versuchsaufbau Komparator Distanz 1	56
4.33	Abweichungen zur Referenz der Mittel der Zyklen 2 und 3 für die Tracker TU, M1 und M2 - Versuchsaufbau Komparator Distanz 2	57
4.34	Messaufbau Rotationstest Tracker auf Leica TM1100	58
4.35	Rotationstest Tracker - 1 Lighthouse	58
4.36	Rotationstest Abweichungen zum Mittelwert des Tracker in X, Y und Z-Achse Ro- tation 2 und 3	59
4.37	Standardabweichung in / quer zur Richtung des Lighthouses	60
4.38	Rotationstest Abweichungen zum Mittelwert der Y-Achse der drei Rotationen	60
4.39	Rotationstest Abweichungen zur ersten Umdrehung	60
4.40	Vergleich der Rotationsabweichung bei unterschiedlichen Distanzen	61
4.41	Vergleich der normierten Rotationsabweichung bei unterschiedlichen Distanzen . . .	61
4.42	Vergleich der Rotationsabweichungen unterschiedlicher Tracker	62
4.43	Modifizierter Tracker bei unterschiedlichen Ausrichtungen	63
4.44	Auswirkung einer abgedeckten Diode auf die Rotationsabweichungen	64
4.45	Rotationsabhängige Abweichung in der Lage - Quer zur Richtung zum Lighthouse .	64
4.46	Messaufbau Kontrolle des Koordinatenzentrums des Trackers	65
4.47	Lageplot der vertikalen Drehung mit geschätztem Halbkreis	66

4.48	Messaufbau Rotationstest Tracker - 2 Lighthouses	66
4.49	Standardabweichung in Richtung der beiden Lighthouses	67
4.50	Abweichungen zum Mittelwert in der XZ-Ebene bei Rotation mit 2 Lighthouses	68
4.51	Abweichungen zum Mittelwert in Richtung der beiden Lighthouses und Höhe bei Rotation mit 2 Lighthouses	68
4.52	Messaufbau Rotationstest Controller	69
4.53	Rotationstest Controller K1	70
4.54	Differenzen zur ersten Umdrehung des Controllers K1	70
4.55	Abweichungen in Längs- und Querrichtung zum Lighthouse	70
4.56	Abweichungen in Längs- und Querrichtung zum Lighthouse - Vergleich der Controller	71
4.57	Controller in unterschiedlichen Ausrichtungen zum Lighthouse in der Halterung mit hervorgehobenen Dioden (grün = auf das LH ausgerichtet, rot = sichtbar, aber anders ausgerichtet)	71
4.58	Messaufbau Rotationstest HMD	73
4.59	Abweichungen zum Mittelwert des HMD ausgerichtet auf das Lighthouse	73
4.60	Differenz zwischen den Rotationen des HMD	73
4.61	Abweichungen zum Mittelwert in Längs- und Querrichtung zum Lighthouse	74
4.62	Standardabweichung der Messungen in Längs- und Querrichtung sowie der Höhe	74
4.63	Vergleich der Rotationsabweichungen von HMD, Controller und Tracker	75
4.64	Rohdaten der Orientierung des Controllers K1 bei Rotation	78
4.65	Wiederholbarkeit der Orientierung des Controllers K1 bei Rotation	78
4.66	Differenz zur Referenz der Orientierung des Controllers K1 bei Rotation	79
4.67	Rohdaten der Orientierung des Trackers M1 bei Rotation - Fall 1	80
4.68	Rohdaten der Orientierung des Trackers M1 bei Rotation - Fall 2	81
4.69	Wiederholbarkeit der Orientierung des Trackers M1 bei Rotation - Fall 1	81
4.70	Differenz zur Referenz des Trackers M1 bei Rotation - Fall 1	82
4.71	Wiederholbarkeit der Orientierung des Trackers M1 bei Rotation - Fall 2	83
4.72	Differenz zur Referenz des Trackers M1 bei Rotation - Fall 2	83
4.73	Rohdaten der Orientierung des Trackers M1 bei Rotation - Wechsel zwischen Fall 2 und Fall 1	84
4.74	Rohdaten der Orientierung des Trackers M1 in Ruhelage - erzwungener Ausrich- tungssprung	86
4.75	Rohdaten der Koordinaten des Trackers M1 in Ruhelage - erzwungener Orientie- rungssprung	86
4.76	Darstellung des Trackers in Unity inkl. Statusanzeige von SteamVR	87
4.77	Koordinatensprung des Trackers M2 bei der Untersuchung des Messbereichs	88
4.78	Ausrichtung der Abweichungen des Messrauschens am Verhältnis zur Lage der Kom- ponenten im Versuchsaufbau Komparator Distanz 2	88
4.79	Messaufbau Komparator Distanz 2 - Ansicht Lighthouse 2	89
4.80	Orientierungssprung des Trackers M2 bei der Untersuchung des Messbereichs	90
4.81	Standardabweichung der Orientierung des Trackers M2 bei der Untersuchung des Messbereichs	90
4.82	Abweichungen in der Höhe beim Verfahren am Horizontalkomparator	92
4.83	Sprunghaftes Verhalten des Trackers bei Rotation mit zwei Lighthouses	93
4.84	Versuchsaufbau - Lage der Komponenten	93
4.85	Versuchsaufbau - Rotation mit 2 Lighthouses - Koordinatensprung	94
4.86	Sprunghaftes Verhalten des Trackers und eines Lighthouses bei Rotation mit zwei Lighthouses	94

4.87 Sprunghaftes Verhalten des Trackers in der Y- Z-Ebene	95
4.88 Sprunghaftes Verhalten des HMD bei Rotation mit zwei Lighthouses	95
4.89 Messaufbau Lighthouseübergang mit überlappendem Bereich	97
4.90 Sprunghaftes Verhalten der Lighthouses beim überlappenden Übergang ohne Sicht- verbindung (grüne Bereiche markieren die Phasen in denen die Lighthouses für die Brille sichtbar waren)	98
4.91 Trajektorie des HMD in Referenz zu den Lighthouses	98
4.92 Abweichungen durch Rotation des Trackers in der Lage bei Aufzeichnung mit VRED	100
4.93 Abweichungen durch Rotation des Trackers in der Lage bei Aufzeichnung mit VRED	100
4.94 Messrauschen bei Aufzeichnung mit VRED	101
4.95 Orientierungswerte des Trackers bei Rotation - aufgezeichnet mit VRED	101
4.96 Orientierungswerte des Trackers bei Rotation - aufgezeichnet mit Unity (Fall 1) . . .	102
4.97 Abweichungen zur Referenz der Orientierung bei Rotation des Trackers - aufgezeich- net mit VRED	102
4.98 Koordinaten bei erzwungenem Orientierungssprung - aufgezeichnet mit VRED . . .	103
4.99 Orientierung bei erzwungenem Orientierungssprung - aufgezeichnet mit VRED . . .	104

Tabellenverzeichnis

3.1	Lösungsansätze für den geometrischen Ansatz der Distanzberechnung	27
4.1	verwendete Komponenten	32
4.2	Standardabweichung des Messrauschens von HMD und Tracker	42
4.3	Spannweite und Standardabweichung des Messrauschens von HMD, Controller und Tracker bei Verwendung von einem Lighthouse	46
4.4	Größe der rotationsabhängigen Abweichungen des Trackers TU in Abhängigkeit der Distanz	60