



Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences



Fachbereich Medien
Faculty of Media



Hochschule Düsseldorf, Fachbereich Medien

in Kooperation mit

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH

Bachelorthesis

Einsatz der Augmented Reality in der industriellen
Zerstörungsfreien Prüfung

von

Robert Deppe

Matr.-Nr.: 649819

Erstprüfer: Prof. Dr. Eng. / Univ. of Tsukuba Jens Herder

Betreuer / Zweitprüfer: Dr. Oliver Nemitz

11. Mai 2018

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Glossar	VIII
Eidesstattliche Erklärung	X
Kurzfassung/Abstract	XI
1 Einleitung	1
2 Ultraschall-Prüfung	5
2.1 Konventionelle Ultraschall-Prüfung	5
2.2 Phased-Array-Prüfung	5
2.3 C-Scan	9
2.4 Encoder	10
3 VR- und AR-Grundlagen	13
3.1 Tracking	13
3.2 Head Mounted Displays	14
4 Anwendung	17
4.1 Anwendungsbeschreibung	17
4.2 Draw vs. Erase	17
4.3 Anforderungen	19

4.4	Wahl des Systems im Fall der Anwendung bei Salzgitter Mannesmann Forschung . . .	20
5	Implementierung	21
5.1	Tracking des Prüfkopfs	21
5.2	Erfassung des Prüfstücks	21
5.2.1	Erfassung der räumlichen Lage des Prüfstücks	21
5.2.2	Fitting des virtuellen Prüfstücks in Punktwolke	23
5.2.3	Das Downhill-Simplex Verfahren	23
5.2.4	Einmessung des Koordinatensystems auf dem Prüfstück	25
5.3	Darstellung der Trackingdaten	26
5.4	Speicher- und Navigationsfunktion	26
5.5	Übertragung der Trackingdaten	27
6	Auswertung	29
6.1	Auswertung der Genauigkeit des VIVE Tracking Systems	29
6.2	Erstellung eines C-Bildes mit der erstellten Anwendung	34
6.3	Beurteilung der physischen Eignung des VIVE-Systems an realistischen Einsatzorten	35
6.4	Auswertung der potentiellen Problematik des Auseinanderlaufens von Signalwegen .	36
6.5	Auswertung des erstellten Anwendungsprotokolls	36
6.6	Auswertung der Qualität des ZEDmini als AR-Kamera	37
6.7	Abschließende Evaluation der erstellten Augmented-Reality Anwendung	37
7	Ausblick	39
7.1	Weitere mögliche Anwendungen	39
7.1.1	Weitergabe der Trackingdaten per Encoderpulse zur Erstellung von C-Bildern	39
7.1.2	Echtzeit-Visualisierung des C-Bildes auf dem Prüfstück	39
7.1.3	Augmented-Reality Darstellung auf einem Tablet	39
7.1.4	Visualisierung der Schallwege im Material	40
7.2	Fazit	40
8	Literaturverzeichnis	42

Anhang	45
A Anhang zur Implementierung	46
B Weitere Grafiken zur Genauigkeitsauswertung des VIVE–Trackingsystems	47
C Inhalt der beiliegenden Daten–DVD	52

Abbildungsverzeichnis

1.1 US-Handprüfplatz bei Europipe. Mit Hilfe des Prüfkopfs wird eine Fläche auf dem Rohr abgefahren und mit der entsprechende Norm geprüft.	2
2.1 Konventionelle Ultraschallmessung. Auf dem digitalen US-Gerät sind im Laufzeit-signal die Bohrung im Innern und ihre Echos erkennbar.	6
2.2 Verschiedene Prüfköpfe (PK) (von links): PK mit runder Schwingfläche, PK mit festem Winkel, Linearer Phased-Array-PK, Linearer Phased-Array-PK mit Wasserleitungen und Vorlaufkeil.	7
2.3 Nicht gleichgerichteter A-Scan. Zur Verfügung gestellt von der SZMF	7
2.4 Verschiedene Arten des Phased-Array-Scans: (a) Sektorscan, (b) Parallelscan (0°), (c) Parallelscan (30°).	8
2.5 Darstellung der Daten im digitalen Sichtteil der SZMF Software. Zur Verfügung gestellt von der SZMF	9
2.6 Hochaufgelöster ortstriggerter C-Scan (Gitterweite 0.1 mm) mit zugehörigem Prüf-stück (umgedreht). Zur Verfügung gestellt von der SZMF	10
2.7 Koordinatensysteme bei Rohren und flachen Prüfstücken	11
2.8 Seilzugencoder, welcher für die Erstellung von C-Bildern genutzt wird	12
4.1 Aufbau des Gesamtsystems bei Verwendung von <i>HTC VIVE</i> Hardware zum Tracking	18
4.2 Schematische Darstellung der verschiedenen Möglichkeiten Prüfwege zu augmentie-ren. (a) DRAW (b) ERASE (c) HYBRID	18
5.1 Am Tracker befestigte Prüfkopfhalterung mit eingespanntem Phased-Array-Prüfkopf (auf der Seite liegend).	22

5.2	Erzeugung des initialen Simplex aus Startparametern	26
6.1	Versuchsaufbau der Präzisionsmessung	30
6.2	Ausschnitt zu Beginn einer Abstandsmessung als E-Kamm. Zu erkennen sind Stillstand zu Beginn, zwei Ausreißer und der erster Stillstand des Trackers	31
6.3	Differenz zwischen den gemessenen Positionen und berechneten Soll-Positionen von 16 E-Kamm Messungen. Blau/Grün sind linke, rote Boxplots die rechten, der Basisstation nähere, Positionen.	32
6.4	Differenz zwischen den gemessenen Positionen und berechneten Soll-Positionen von 14 W-Kamm Messungen. Rote Boxplots sind vordere, blau/grüne hintere, der Basisstation nähere, Positionen.	33
6.5	Versuchsaufbau für die Erstellung eines C-Scans mit der erstellten Anwendung . . .	34
6.6	Durch VIVE-Trackingdaten erstellter C-Scan (Gitterweite 3 mm) mit zugehörigem Prüfstück (umgedreht)	35
6.7	AR-Ansicht der Anwendung. Fehlerhafte Oberflächenerkennung gut sichtbar.	38
A.1	Schematischer Aufbau der wichtigsten Klassen der AR-Anwendung	46
B.1	E- und W- Kammmuster mit Start-, Stoppunkten und Maßen. Die auf der Grafik obere rechte Ecke lag am nächsten an Basisstation-B. Die in den hier dargestellten Kämmen „oberen“ Punkte sind im Versuchsaufbau „hinten“ (Abbildung 6.1)	48
B.2	Kompletter Scandurchgang eines E-Kamms.	49
B.3	Beispielhafte Debug-Visualisierung der zurückgelegten Wege des Trackers bei der Aufnahme eines E-Kamms (oben) und eines W-Kamms (unten)	50
B.4	Aufbau des Genauigkeitsversuchs	51

Tabellenverzeichnis

3.1	Vergleich der Spezifikationen von Trackingsystemen	15
3.2	Vergleich der Spezifikationen von Ausgabegeräten	16
5.1	Datagram des selbst definierten Protokolls für ein flaches Prüfstück	28

Glossar

AR *Augmented Reality*, Anreicherung der Realität durch künstliche, virtuelle Inhalte [DBGJ13].

BLOB *Binary Large Object data*, große, nicht zeichencodierte Binärdateien, wie Audio, Rastergrafiken oder Video.

DOF *Degree of Freedom*, Freiheitsgrade eines Objektes im Raum.

fitting Modellierung einer vorgegebenen Funktion oder von Modellparametern anhand von gegebenen Punkten.

HMD *Head-mounted Display*, optisches, auf dem Kopf getragenes Ausgabegerät, welches ein computergesteuertes Bild auf das Auge projiziert oder auf einem Bildschirm darstellt. Es findet in der Regel Verwendung in Virtual- oder Augmented-Reality-Anwendungen [DBGJ13].

IR *Infrarot*, elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge von 780–1000 nm.

OSC *Open Sound Protocol*, Open Source IP basiertes Nachrichtenprotokoll.

SDK *Software Development Kit*, Sammlung von Software-Bibliotheken und Werkzeugen zur Entwicklung von Software.

UI *User Interface*, Schnittstellen, an denen der Mensch mit der Maschine interagiert. Das Design der UI ist oft maßgeblich für den intuitiven und damit effizienten Umgang mit einer Anwendung.

US *Ultraschall*, hochfrequenter Schallbereich, dessen Frequenzen oberhalb der vom Menschen hörbaren oberen Grenzfrequenz liegt. In der ZiP sind dies Frequenzen von ca. 20 kHz bis 50 MHz [DPD⁺10].

ZfP *Zerstörungsfreie Prüfung*, Untersuchung eines Prüfstückes, ohne dieses durch z.B. Fräsungen zu zerstören. Weitere ZfP Methoden - abgesehen von der Ultraschallprüfung - sind z.B. Wirbelstromprüfungen oder Röntgenprüfungen.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Robert Deppe, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Düsseldorf, den 11. Mai 2018

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit ist es, den Einsatz von Augmented Reality Technologie für die händische, zerstörungsfreie Ultraschallprüfung von Produkten der Metallindustrie zu beschreiben und für diesen einen Prototypen zu erstellen. Dieser wird mit Hilfe von Soft- und Hardware aus der Spielebranche umgesetzt und kann die Positionswerte zur Erstellung eines C-Scans liefern. Durch die Verwendung des *ZEDmini* und der *HTC VIVE* wird eine Echtzeitabbildung des Prüfpfadtrackings im HMD ermöglicht, sowie das Setzen von Markierungen auf dem Prüfstück in der erweiterten Realität der Anwendung. Teil der Umsetzung ist die Implementierung des *Downhill-Simplex*-Optimierungsalgorithmus, mit dem ein Fitting des Prüfstücks in eine Punktwolke der Oberfläche durchgeführt wird. Danach wird die Genauigkeit des verwendeten Trackingsystems statistisch ausgewertet, wobei bei günstiger Ausleuchtung Genauigkeiten von ca. 1–2 Millimetern festgestellt werden. Die Arbeit ist sowohl für Forschungsinstitute der Metallindustrie, als auch für andere Arbeitsbereiche interessant, in denen potentiell eine Erweiterung durch AR stattfinden kann.

Schlagwörter

Zerstörungsfreie Prüfung, Ultraschall, Erweiterte Realität, Tracking, Stereokamera, HTC VIVE, ZED-mini, NDT, ZfP, AR

Abstract

The aim of this thesis is to describe the application of augmented reality technology in non-destructive testing of products of the metal-industry and to create a prototype. This prototype is created with hard- and software, that is usually employed in the gaming industry, and delivers positions for creating c-scans. Using the *ZEDmini* in combination with the *HTC VIVE* enables realtime visualisation of the probes path in the HMD, as well as the setting of virtual markers on the specimen. As a part of the implementation the *downhill-simplex* optimization-algorithm is implemented to fit the specimen to a cloud of recorded surfacepoints. The accuracy is statistically tested and evaluated with the result, that the *VIVE*-trackingsystem is accurate up to ca. 1-2 millimeters in well lit conditions. This thesis is of interest not only for research-institutes of the metal-industry, but also for any areas of work, in which the enhancement with augmented-reality is possible.

Keywords

Nondestructive Testing, Ultrasonic, Augmented Reality, Tracking, Stereocamera, HTC VIVE, ZED-mini, NDT, ZfP, AR

1 Einleitung

Viele heutige Endprodukte der Metallindustrie müssen hohe Standards erfüllen. Sie müssen hohem Druck standhalten und nachweisbar sicher sein, wie beispielsweise Pipelinerohre oder Castorbehälter¹. Zur Sicherstellung dieser und anderer Anforderungen werden verschiedene Prüfungen an den Produkten vorgenommen. In den letzten Dekaden hat sich vor allem die Ultraschallprüfung als zerstörungsfreie Prüfmethode in der Materialprüfung von Metallprodukten durchgesetzt. Mit ihr werden sowohl Vorprodukte, wie Brammen und Bleche, als auch fertige Produkte wie Rohre untersucht. Eine solche ultraschallbasierte, zerstörungsfreie Prüfung kann voll-, halbautomatisch oder von Hand erfolgen. Vollautomatische Prüfungen erfolgen in der Regel im Rahmen der Produktion und werden in Prüfanlagen durchgeführt, welche speziell auf das Produkt zugeschnitten sind. In ihnen sind oft mehrere Prüfköpfe an vorbestimmten, idealen Punkten, z.B. entlang einer Rohrkrümmung, fest angeordnet. Diese scannen, je nach Anforderung, Stichproben oder alle hergestellten Produkte.

Wird beispielsweise bei der Prüfung eines Rohres eine definierte ungenügende Qualität festgestellt, kann dieses einer manuellen Untersuchung zugeführt werden. An Arbeitsplätzen für manuelle Nachprüfungen kommt ein handgeführter Ultraschall-Prüfkopf zum Einsatz, mit dem die fragliche Stelle auf dem Rohr untersucht wird (Abbildung 1.1). Überschreitet während des Abfahrens eine gemessene Amplitude die durch Normen vorgegebene Hüllkurve, muss der Fehler registriert und im ungünstigsten Fall als unzulässig notiert werden. Bei einer solchen Prüfung ist es wichtig, dass der vollständige, relevante, zu untersuchende Bereich auf dem Prüfstück mit dem Ultraschall-Prüfkopf abgefahren wird. In dieser Arbeit soll untersucht werden, inwiefern ein Spiele-Trackingsystem mit einer Stereokamera in einer AR-Anwendung kombiniert werden kann, um diese manuelle US-Prüfung zu unterstützen.

¹Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Materialien

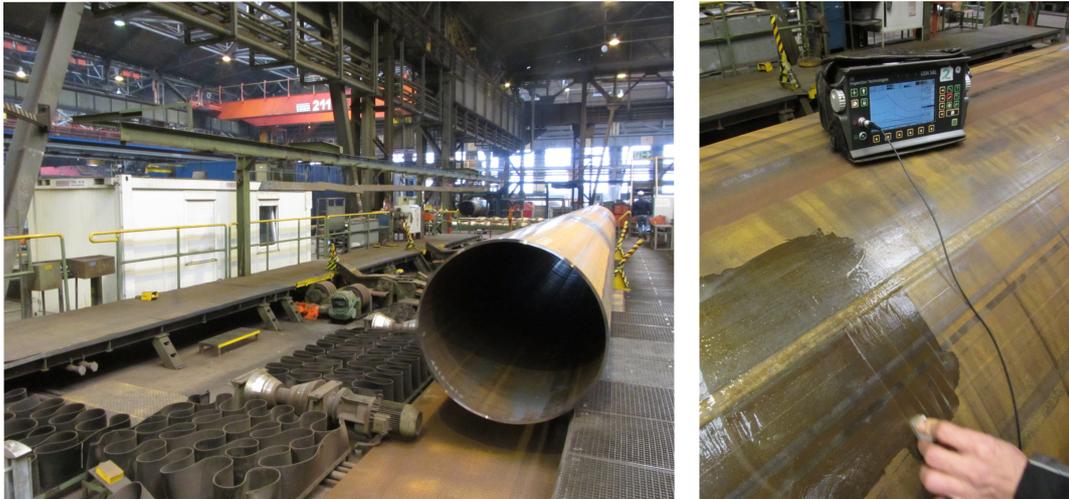


Abbildung 1.1: US-Handprüfplatz bei Europipe. Mit Hilfe des Prüfkopfs wird eine Fläche auf dem Rohr abgefahren und mit der entsprechende Norm geprüft.

Hierdurch wird eine Verbindung zwischen den Messwerten und der Position des Prüfkopfes hergestellt, welche neben der grafischen Darstellung eines abgefahrenen Bereiches auch für die Erstellung von zweidimensionalen C-Scans genutzt wird. Durch das unmittelbare Feedback der AR-Anwendung im HMD lassen sich beispielsweise Prüflücken sofort feststellen und korrigieren. Zudem können benutzerdefinierte Markierungen im Prüfpfad angelegt werden, welche ein späteres Auffinden von auffälligen Stellen auf dem Prüfstück ermöglichen.

Verwandte Forschung

Eine ähnliche Anwendung zur AR-gestützten Ultraschallprüfung wurde 2015 von *Olympus* im Patent *A system and method of non-destructive inspection with a visual scanning guide* beschrieben [LLSLH15]. In diesem wird eine Prüfsituation nach dem ERASE Prinzip (Abschnitt 4.2) beschrieben, dem ein zuvor generierter spezifischer Prüfplan zugrunde gelegt wird. Das Patent beschreibt weitergehend Details wie einen Toleranzbereich um die abzufahrende Linie, welche auch aus dem Prüfplan errechnet wird. Es beschreibt jedoch keine Navigationshilfe, welche es ermöglicht, Punkte zu markieren, um sie zu einem späteren Zeitpunkt wieder zu finden.

Im Artikel *Augmented reality application for training in pipe defects ultrasonic investigation* wird die Implementation eines AR-Systems demonstriert, welches die Durchführung einer Ultraschallprü-

fung von Rohren lehrt [AZPT17]. Die Anwendung wurde mit *Unity* umgesetzt, welches die Markerkennung mit *Vuforia* realisiert. Die korrekte Skalierung der dreidimensionalen Darstellung des zu prüfenden Rohres wird anhand der Markergröße definiert.

Ein dem AR unterstützten US-Tracking ähnelndes AR-Konzept findet sich im Artikel *The Start-Up Using Augmented Reality to Clean Up The Real World* für die Putzoptimierung im Bereich der Hygiene [Bon17]. Das beschriebene System zeigt ungeputzte Bereiche auf Boden und Fenster an, welche es der Putzkraft ermöglichen, die zu putzenden Bereiche lückenfrei zu säubern. In den verschiedenen Konzepten wird das Hybride Markierungssystem (Abschnitt 4.2) verwendet, welches den noch zu säubernden Bereich und den bereits geputzten in unterschiedlichen Farben visualisiert. Die beim Putzen generierten Daten sollen nicht nur der Putzkraft helfen, sondern auch ermöglichen, Vorgang und Ergebnis zu überwachen und so die Qualität zu verfolgen.

Der Artikel *Using Laser Projections for Augmented Reality* beschreibt ein AR-System zur Überprüfung von Schweißpunkten, welches mit Hilfe eines Laserprojektors die Fehlerquote bei Inspektionen senken soll [SPHK08]. Durch Navigationshilfen wie kleiner werdende Kreise oder Pfeillinien werden spezifische Schweißpunkte hervorgehoben, wodurch sich die Zeit des Aufsuchens verkürzt. Es wird sowohl auf Probleme der Reflektivität der Projektionsoberfläche, als auch bei der Positionierung des Lasers hingewiesen.

Ein weiteres System zum Tracken eines Ultraschallkopfes findet sich im Artikel *Design, simulation, and kinematic analysis of a manipulator-based 3D position tracking system* [FFS⁺15]. Die Anwendung liegt nicht in der ZfP, sondern im medizinischen Gebiet und dient der Erstellung eines dreidimensionalen Organbildes, welches ähnliche Anforderungen hat, wie zum Beispiel die Erstellung eines C-Bildes (Abschnitt 2.3). Hier wird ein Trackingsystem beschrieben, welches auf encodergetrackten Manipulatoren basiert und eines Führungsgerüsts bedarf.

Im Juni 2017 veröffentlichten *Centre technologique en aérospatiale, St. Hubert* und *Zetec, Québec* im Konferenz-Artikel *Non-contact tracking of phased-array probe and real-time generation of C-scans for the inspection of composite aerospace structures* ein System, mit dem ein US-Prüfkopf zur

Untersuchung von Flugzeugkomponenten mit optischem Tracking getrackt werden kann [WBA⁺07]. In der Veröffentlichung wird ein großer Wert auf das Erkennen der abzuscannden Geometrie gelegt, da die zu untersuchenden Komponenten der Luftfahrt oft sehr komplexe Formen haben, im Gegensatz zu Rohprodukten der Metallindustrie wie Bleche oder Rohre. Auch wird die Auswertung der Entfernung des Prüfkopfes zur Oberfläche beschrieben, sowie mögliche Algorithmen die US-Werteaufzeichnung nur bei korrekter Bedienung zu ermöglichen.

Aufbau dieser Arbeit

Diese Arbeit beschreibt zunächst sowohl die Grundlagen der ultraschallbasierten Prüfung von Stahlprodukten, als auch der VR und AR. Daraufhin wird die AR-Anwendung in ihren einzelnen Komponenten beschrieben. Im Kapitel Implementierung wird der allgemeine Ablauf der Anwendungsbedien-
nung und der verwendete *Downhill-Simplex*-Algorithmus erläutert. Sowohl die Anwendung als auch die verwendete VR- und AR-Technologie wird im Kapitel Auswertung beurteilt. Schließlich werden weitere mögliche Ergänzungen ausgeführt, die in Zukunft als Erweiterung der Anwendung implementiert werden könnten.

2 Ultraschall-Prüfung

2.1 Konventionelle Ultraschall-Prüfung

Ein klassisches Ultraschallprüfsystem besteht aus mehreren Teilsystemen [DPD⁺10]. Die meisten heutigen verwendeten Übertragungs/Empfangs-Prüfköpfe (Abbildung 2.2) funktionieren nach dem piezoelektrischen Prinzip. Durch ein elektronisches Signal angeregt, geben sie einen hochfrequenten mechanischen Impuls in das zu untersuchende Prüfstück. Es wird in der Regel mit einer Impulsfolgefrequenz von 18 bis über 1500 Impulsen pro Sekunde gearbeitet. Die Schwingung muss nicht orthogonal zur Oberfläche des Prüfstücks erfolgen, sondern kann auch unter einem Winkel angeregt werden. Dadurch ist es möglich, auch unzugängliche Stellen im Material zu erreichen. Im Prüfstück wird das Signal an Rissen, Einschlüssen und anderen Fehlern reflektiert und vom Prüfkopf wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt. Das am Prüfkopf empfangene Signal wird über ein Kabel an das Ultraschallgerät übertragen, wo es digitalisiert wird. Manche Ultraschallgeräte sind in der Lage, die Amplitude des Signals in Abhängigkeit der Laufzeit als *A-Scan* anzuzeigen (nicht gleichgerichteter *A-Scan* in Abbildung 2.3, gleichgerichteter *A-Scan* in Abbildung 2.5). Außerdem können manche Geräte die digitalisierten Signalwerte weiter an eine externe Recheneinheit senden, wo sie weiterverarbeitet werden können. Anhand der Amplitude und ihrer Veränderung durch Bewegung des Prüfkopfes kann die Position des Fehlers bestimmt werden. Ein Handprüfvorgang mit allen Komponenten ist in Abbildung 2.1 zu sehen.

2.2 Phased-Array-Prüfung

Im Gegensatz zu einem konventionellen US-Prüfgerät verfügt ein Phased-Array-Prüfgerät über eine Gruppe von mehreren Ultraschall-Sende-/Empfangseinheiten (üblicherweise 16 bis 256). Diese sind

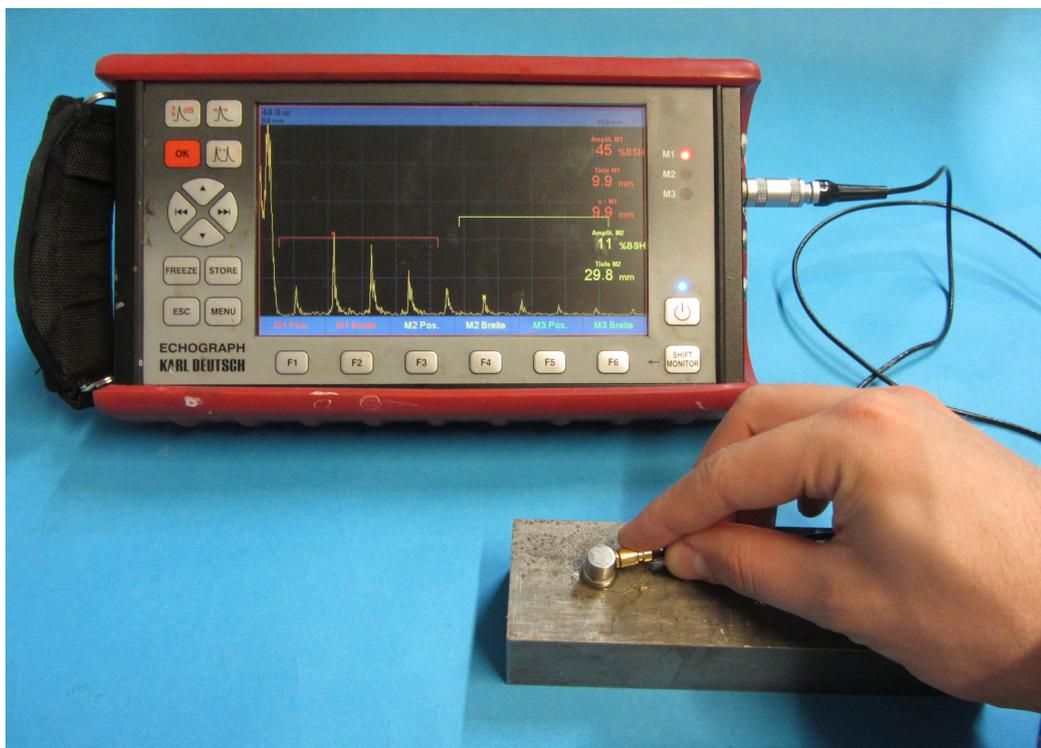


Abbildung 2.1: Konventionelle Ultraschallmessung. Auf dem digitalen US-Gerät sind im Laufzeit-signal die Bohrung im Innern und ihre Echos erkennbar.



Abbildung 2.2: Verschiedene Prüfköpfe (PK) (von links): PK mit runder Schwingfläche, PK mit festem Winkel, Linearer Phased-Array-PK, Linearer Phased-Array-PK mit Wasserleitungen und Vorlaufkeil.

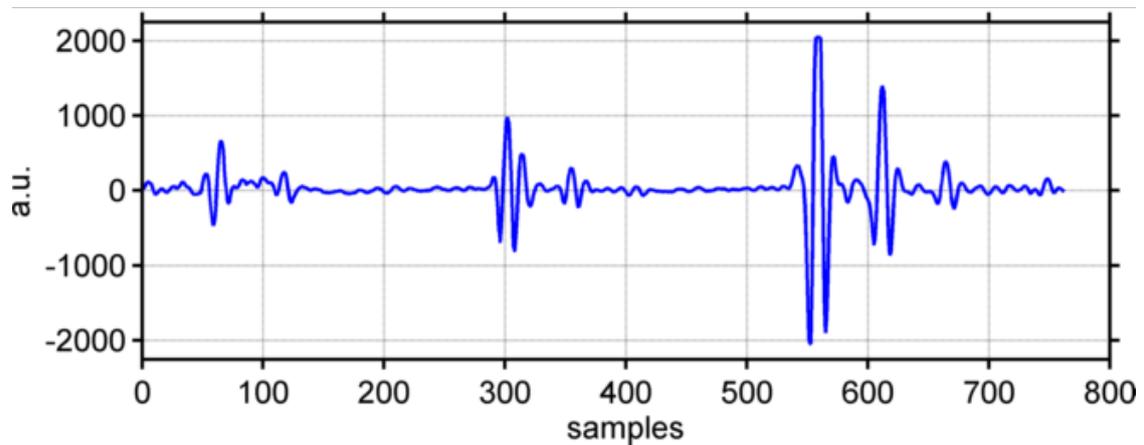


Abbildung 2.3: Nicht gleichgerichteter A-Scan. Zur Verfügung gestellt von der SZMF

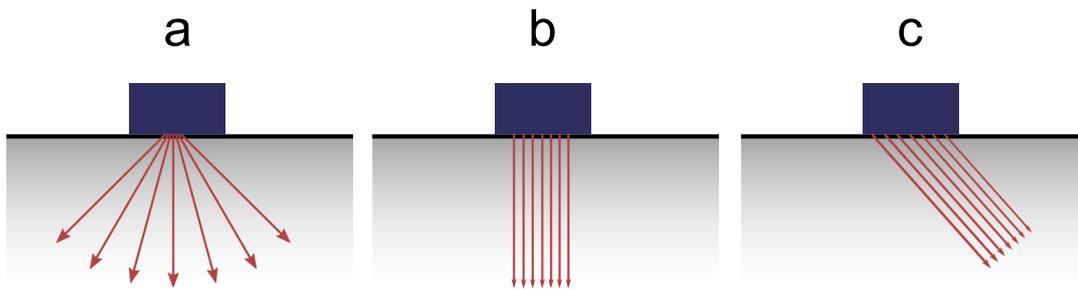


Abbildung 2.4: Verschiedene Arten des Phased-Array-Scans: (a) Sektorscan, (b) Parallelscan (0°), (c) Parallelscan (30°).

meist in einer linearen Reihe angeordnet, können aber auch als 2D-Matrix, im Ring oder in anderen Formen angeordnet sein. Durch zeitverzögerte Anregung der Array-Elemente können konstruktive und destruktive Interferenzen im Schallbild des Prüfkopfes erzeugt werden. Die erzeugten Schallwellen lassen sich so richten und unter einem definierten Winkel mit einem wählbaren Fokus in das Prüfstück übertragen [MBH⁺04]. Die über die Zeit aufgezeichneten Messdaten werden in einer Recheneinheit zu Analysebildern verarbeitet. Solche Analysebilder sind beispielsweise B- und C-Scans.

B-Scan Einen B-Scan erhält man, indem mehrere A-Scans, deren Amplitude farblich codiert wird, nebeneinander dargestellt werden. Im B-Scan in Abbildung 2.5 stellt jede Zeile einen A-Scan dar. Zur Aufnahme von B-Scans können verschiedene Einschallmuster (Scans) verwendet werden. Gängige sind beispielsweise:

- In einem zuvor eingegrenzten Bereich werden die US-Wellen in unterschiedlichen Winkeln in das Material eingekoppelt. Dadurch kann eine große Fläche erfasst werden. Diese Art des Scans wird *Sektorscan* genannt ((a) in Abbildung 2.4)
- Einschallung parallel liegender US-Wellen senkrecht ((b) in Abbildung 2.4) oder unter einem Winkel ((c) in Abbildung 2.4) in einem *Linearscan*

Je nach Anwendung können auch andere bzw. Mischformen Verwendung finden. Erfolgt eine nicht parallele Verteilung der US-Wellen, ist für eine örtlich korrekte Darstellung eine Entzerrung nötig.

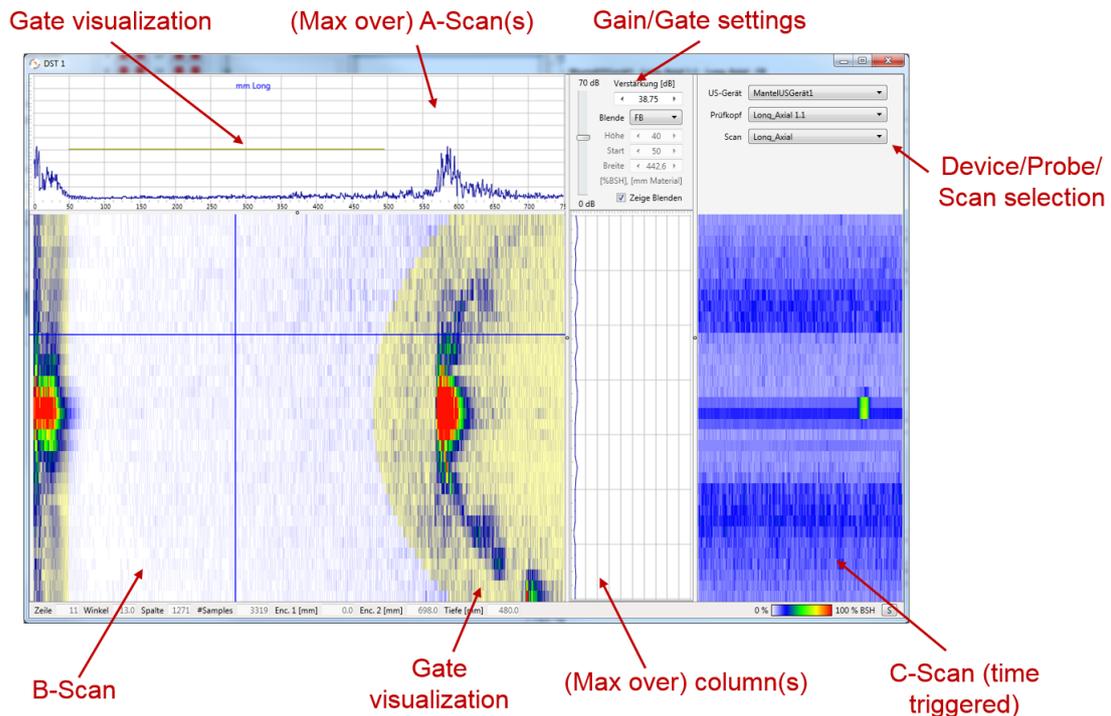


Abbildung 2.5: Darstellung der Daten im digitalen Sichtteil der SZMF Software. Zur Verfügung gestellt von der SZMF

2.3 C-Scan

Um eine Grafik zu erzeugen, welche im einfachsten Fall einer räumlichen Draufsicht, ähnlich einem Röntgenbild, entspricht, muss ein zweidimensionales Gitter über das Prüfstück gelegt werden. Dieses Gitter hat bei kleineren (beispielsweise 50 cm x 30 cm) Prüfstücken in der Regel Millimetrauflösung, bei größeren wird diese entsprechend angepasst. Pro Gitterpunkt können ein oder mehrere Schüsse durchgeführt werden. Ein Schuss entspricht bei einem konventionellen Prüfkopf einem A-Scan; bei einem Phased-Array Prüfkopf einem B-Bild. Die gemessenen Werte werden nun auf einen Wert reduziert, welcher stellvertretend für den Gitterpunkt steht. Im einfachsten Fall wird das Maximum aller an der Stelle vorhandenen Werte farblich kodiert. Da im Eingangssignal meist starke Reflexionen von der Ober- und Unterseite des Prüfstückes enthalten sind, wird eine für die Prüfung gewünschte Tiefe mit Hilfe einer Blende (*Gate*) eingestellt. Diese wird bei jedem Gitterpunkt angewendet. Außerhalb liegende Werte werden ignoriert. Das so entstandene Bild wird als C-Scan bezeichnet (Abbildung 2.6). Im zeitgetriggerten C-Scan in Abbildung 2.5 stellt jede Spalte einen reduzierten B-Scan dar [AKMN14,

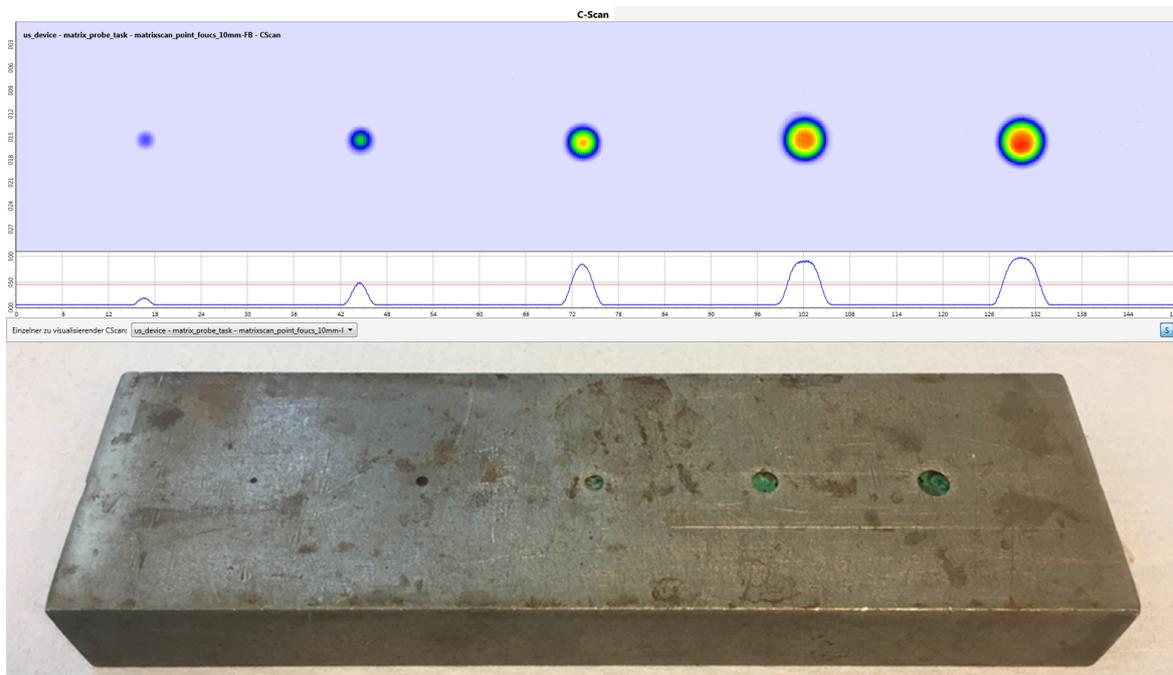


Abbildung 2.6: Hochaufgelöster ortsgetriggter C-Scan (Gitterweite 0.1 mm) mit zugehörigem Prüf-
stück (umgedreht). Zur Verfügung gestellt von der SZMF

S.49].

2.4 Encoder

Auf einem C-Bild sollen die reduzierten Ultraschalldaten ortsgesteuert nebeneinander dargestellt werden. Hierfür ist es notwendig die Position des Prüfkopfes zu kennen. In (teil-)automatisierten Prüf-
automaten sitzen an den Achsen Erfassungsgeräte, die *Encoder* (Abbildung 2.8). Encoder generieren in Abhängigkeit ihrer Rotation elektrische Impulse, welche durch eine externe Einheit (z.B. ein US-
Gerät) in die aktuelle Position umgesetzt werden. Encoder werden an verschiedenen Stellen eingesetzt und unterscheiden sich zum Teil in ihrer Dimension und Genauigkeit:

- Motor-Encoder befinden sich innerhalb von Motoren und werden beispielsweise für das Auslesen der Position von verfahrenen Achsen verwendet.
- (Zahn-) Rad-Encoder werden beispielsweise zur Erfassung von Rotationen von Rohren auf dem Prüfstand eingesetzt. Sie sind einfach aufgebaut und aufgrund ihrer Robustheit auch in widrigen

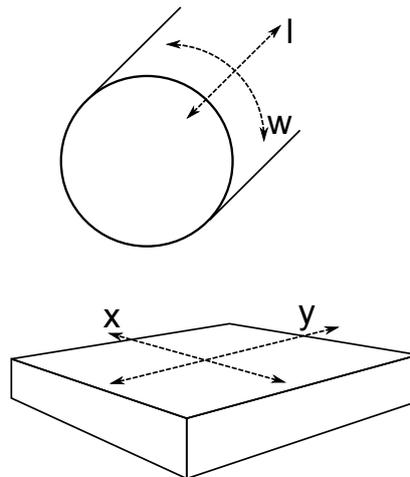


Abbildung 2.7: Koordinatensysteme bei Rohren und flachen Prüfstücken

Umgebungen einsetzbar.

- Seilzugencoder finden Anwendung in der manuellen Prüfung und können mittels Magneten z.B. an einem Rohr mobil befestigt werden. Der Seilzugencoder beinhaltet eine Winde, deren Seil am Prüfkopf befestigt wird. Der Prüfkopf muss hierbei weiterhin per Hand bewegt werden; die Seilzugencoder sind lediglich für das Tracking zuständig.

Encoder geben die genaue inkrementelle Differenz zur letzten Position an, woraus die aktuelle Position auf dem Prüfstück ermittelt wird. Bei einem Rohr sind Längs- und Umfangsposition die verwendeten Positionsangaben (Abbildung 2.7). Es ist auch möglich, eine Encodierung bei einer Handprüfung vorzunehmen, jedoch ist in einem solchen Fall eine Übersetzung, beispielsweise in Form von Seilzügen, nötig.



Abbildung 2.8: Seilzugencoder, welcher für die Erstellung von C-Bildern genutzt wird

3 VR– und AR–Grundlagen

3.1 Tracking

Damit eine Interaktion in der virtuellen Welt erfolgen kann, ist es notwendig die reale Interaktion zu verfolgen. Eine solche Verfolgung schwankt im Grad der Komplexität und kann von der Betätigung eines Knopfes bis hin zu umfangreichen Anwendungen, wie der Verfolgung von Bewegungen am ganzen Körper, reichen. In der Regel ist eine kontinuierliche Verfolgung wünschenswert, welche als *Tracking* bezeichnet wird [DBGJ13, S.97]. Die Verfolgung von Bewegungen im Raum ist aufgeteilt in die beiden Bewegungsmöglichkeiten Translation und Rotation, welche aus Komponenten in je drei Dimensionen bestehen. Für das Tracking jedes einzelnen Punktes im Raum ist dementsprechend die Verfolgung der sechs Freiheitsgrade (DOF) notwendig.

Technisch wird beim Tracking die Änderung in Bezug auf ein Referenzsystem ermittelt. Befinden sich die Trackingkomponenten auf dem zu trackenden Objekt und verfolgen die Veränderung eines außenliegenden Referenzsystems, wird dies als *Inside–Out–Tracking* bezeichnet. Ein Beispiel hierfür ist das auf rotierenden Lasern basierende Tracking des *HTC–VIVE*–Systems, welches mit Hilfe von Fotoresistoren auf HMD und Controllern die Laserimpulse von außenliegenden Projektoren empfängt (Tabelle 3.1). Es wird von *Outside–In–Tracking* gesprochen, wenn die verfolgenden Trackingkomponenten außerhalb des zu trackenden Objektes liegen. Ein solches System ist beispielsweise die *Oculus Rift*, die durch IR–LEDs an HMD und Controllern Features für die Erkennung durch eine außerhalb positionierte Kamera besitzt.

In der Regel werden mehrere Trackingsysteme kombiniert, um z.B. Drift–Fehler auszugleichen oder

die Abtastrate zu erhöhen. Die Komponenten der *HTC VIVE* besitzen beispielsweise neben den erwähnten Fotoresistoren auch ein Gyroskop und Accerolometer, welche mit einer wesentlich höheren Frequenz Messdaten liefern können. Meist werden diese Sensoren zusammen mit weiteren kostengünstigen Komponenten, wie einem Kompass, in einem Chip in Form einer *Inertial Measurement Unit* (IMU) zusammengefasst. Da Sensoren der IMU keine externe Referenz haben, summieren sich hier Fehler auf, die *Drift-Fehler* genannt werden. Durch eine Fusion der IMU Signale und der Signale des optischen Trackings ist es möglich, die relativ niedrige Frequenz des optischen Trackings durch die hochfrequenten Werte der IMU zu ergänzen.

3.2 Head Mounted Displays

Nichtinteraktive AR-fähige HMD können allgemein in See-Through-HMD und Video-HMD unterteilt werden. Zwischen ihnen besteht durch die unterschiedlich verwendeten Techniken nicht nur ein funktionaler sondern in der Regel auch ein großer preislicher Unterschied.

See-Through-HMD AR-Hardware wie die *Microsoft Hololens* bietet durch ein transparentes Display die Möglichkeit das direkte Sichtfeld zu überlagern [DBGJ13, S.150]. Da die "Realität in diesem Fall nicht zuerst durch eine Kamera aufgenommen und dann über ein Display wiedergegeben werden muss, entfallen Beeinträchtigungen wie ein zu kleines Sichtfeld, Farbfehler oder Latenz in der Darstellung der realen Welt. Da jedoch in der Regel das verwendete Display durchlässig sein muss, entstehen neue Darstellungsprobleme wie ein mangelnder Kontrast zwischen Realität und Display.

Video-HMD Ein Video-HMD ist eine Kombination aus einem klassischem HMD und einer (Stereo-) Kamera. Da das Kamerabild vor der Darstellung vom Computer verarbeitet werden muss, ist es möglich, das sichtbare Bild ohne Kontrastprobleme um computergenerierten Inhalt zu erweitern [DBGJ13, S.149]. Nachteile des Systemes bestehen sowohl in der Darstellung als auch in der Kombination mit der Stereokamera. Da die vollständige Darstellung auf einem Display basiert, ist der Realitätseindruck nicht so gut wie bei See-Through HMDs. Weitergehend kann eine Latenz der Stereokamera die Ursache für Motion Sickness sein.

Systeme	HTC VIVE ^a [IIIG116]	Oculus Rift ^b	Optitrack ^c [ADM17]	Vuforia	Microsoft Mixed Reality ^d
Genauigkeit	bis zu 350 µm ^e		bis zu ca. 175 µm	Von der Entfernung Abhängig	Von der Entfernung abhängig
Abtastrate möglicher Trackingbe- reich	1000 Hz bis zu 4 m x 4 m	1000 Hz 1,5 m x 1,5 m (eine Kamera)	bis 100-360 Hz Mit mehr Kameras beliebig vergrößert- bar ^g	bis 60 Hz/ beliebig	beliebig
Sensoren	Accelerometer, Gyroskop, Lighthou- se Laser System, Kamera	Accelerometer, Gyroskop, Magneto- meter, Constellation Tracking	retroreflektierende IR Markererkennung	(Tiefen-) Kamera / Markererkennung	Stereokamera HMD
Schnittstellen	HDMI, USB 3, Blue- tooth	HDMI, USB	GigE oder USB 2.0	(Schnittstellen des Mobilgerätes)	HDMI, USB 3
Mobilität / Größe	Lighthouse Projekto- ren, kabelgebundenes HMD	Kamera, kabelgebun- denes HMD	Größe beliebig erweiterbar	Tablet/Mobiltelefon, Marker	unbegrenzt, bei rechenintensiven Anwendungen Ka- belgebunden

Tabelle 3.1: Vergleich der Spezifikationen von Trackingsystemen

^a<https://www.vive.com/de/product/> Aufgerufen 1.Januar 2018

^b<https://www.digitaltrends.com/virtual-reality/oculus-rift-vs-htc-vive/> Aufgerufen 1.Januar 2018

^c<https://www.optitrack.com/hardware/compare/> Aufgerufen 1.Januar 2018

^dhttps://developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/motion_controllers Aufgerufen 1.Januar 2018

^ebei 30 cm Entfernung der Laserprojektoren

^fDie Abtastrate der IMU beträgt beispielsweise beim iPhone 6 bis zu 4 kHz (<https://www.macrumors.com/2014/09/26/iphone-6-6-plus-two-accelerometers-be-sucht-2-Mai-2018>), das SDK stellt jedoch höchstens 60 FPS zur Verfügung. <https://library.vuforia.com/articles/Solution/Framerate-Optimization-for-Mixed-Reality-Apps> besucht: 2. Mai 2018

^gBei [ADM17] beträgt das größte Volumen 4 m x 4 m x 3 m

Ausgabegerät	Oculus Rift	HTC VIVE	Microsoft Hololens
Displaytyp	HMD	(Video-)HMD	See-Through HMD
Auflösung pro Auge	1080 x 1200 px	1080 x 1200 px	1268 x 720 px
höchste Bildfrequenz	90 FPS	90 FPS	60 FPS
Field of View	110°	110°	35°
Art des Trackings	Outside-In	Inside-Out	Inside-Out
Min. erforderliche Grafikkartenleistung ^a	5803	8778	(Grafikkarte verbaut)

^aFür den Vergleich wurden Daten des Benchmarktests PassMark verwendet (https://www.videocardbenchmark.net/gpu_list.php Aufgerufen 1. Januar 2018). Angegeben ist jeweils die geringste notwendige Grafikkartenleistung

Tabelle 3.2: Vergleich der Spezifikationen von Ausgabegeräten

4 Anwendung

4.1 Anwendungsbeschreibung

Die AR-Anwendung unterstützt die Prüfung visuell und gibt gleichzeitig die getrackten Transformationsdaten des Ultraschall-Messkopfes an das Ultraschallgerät bzw. die US-Software weiter. Der US-Prüfkopf wird mit Hilfe einer speziell angefertigten Vorrichtung an einem Handcontroller der *HTC VIVE* befestigt, die den Prüfkopf an einer definierten Stelle relativ zum Controller positioniert. Das HMD ist mit einer Stereokamera ausgestattet, welche es ermöglicht, dass der mit dem Prüfkopf abzufahrende Weg im HMD eingeblendet werden kann. Nach dem Start des Messvorganges wird der bereits abgefahrene Weg grafisch gelöscht bzw. hinzugefügt. Die Datenverarbeitung und -darstellung erfolgt mittels einer Spieleengine, *Unity3D* (Unity), welche eine flexible Anwendung und einfache Erweiterbarkeit ermöglicht. Weiterhin ist es durch das System möglich, ein auffallendes Echosignal auf dem Rohr zu markieren, welches zu einem späteren Zeitpunkt wieder lokalisiert werden kann. Die durch das Trackingverfahren gewonnenen Positions- und Rotationsdaten werden durch eine Netzwerkverbindung an den Datenverarbeitungsrechner übermittelt, welcher hierdurch die vom Messkopf empfangenen Daten zu einem zweidimensionalen C-Bild oder zu einem dreidimensionalen Bild, mit Tiefeninformationen über das untersuchte Prüfstück, zusammenfügen kann.

4.2 Draw vs. Erase

Es gibt unterschiedliche Ansätze, wie eine Markierung des mit dem Prüfkopf abzufahrenden Weges umgesetzt werden kann (Abbildung 4.2). Sie haben Vor- und Nachteile und sind abhängig von der Situation, in der die Anwendung verwendet wird.

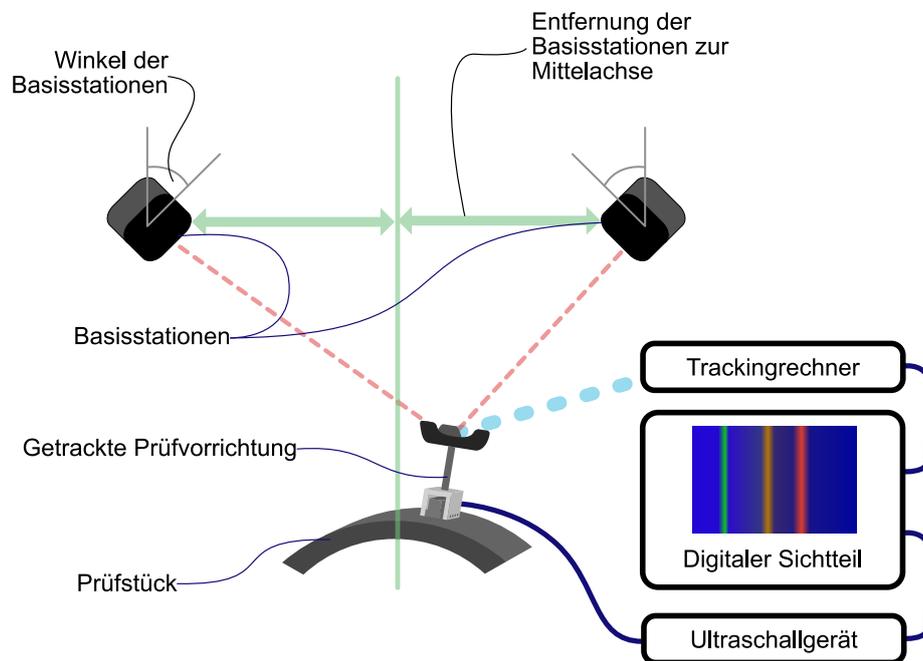


Abbildung 4.1: Aufbau des Gesamtsystems bei Verwendung von *HTC VIVE* Hardware zum Tracking

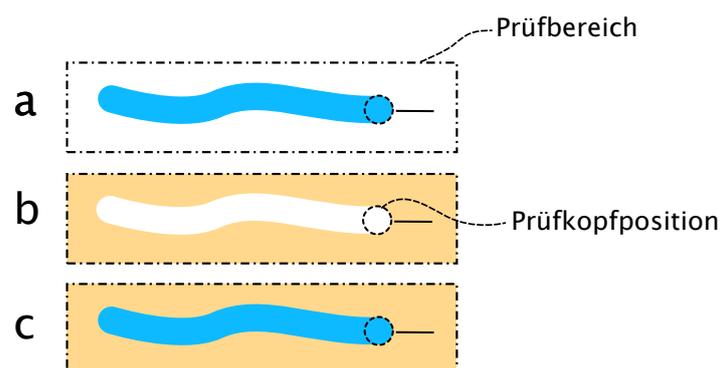


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der verschiedenen Möglichkeiten Prüfwege zu augmentieren. (a) DRAW (b) ERASE (c) HYBRID

Entfernung des noch abzufahrenden Weges – ERASE In vielen Prüfsituationen wird ein Prüfplan erstellt, welcher einen Prüfpfad beinhaltet, der auf die zu prüfende Stelle speziell zugeschnitten ist. Ein Beispiel hierfür wäre eine Kurve, die außerhalb einer schwer erreichbaren Schweißnaht liegt, um sie unter einem bestimmten Winkel zu untersuchen. Wenn ein solcher spezifischer Plan nicht vorliegt, ist es üblich, regelmäßige flächendeckende Muster, wie ein mäanderndes Muster, zu verwenden. Sofern bei der Prüfung ein Prüfplan vorliegt, kann dieser verwendet werden, um einen Pfad einzuzeichnen, welcher mit dem Prüfkopf abgefahren werden soll. In diesem Fall erfordert die Detektion einer Prüfkopfbewegung eine algorithmische Auswertung, ob der Pfad getroffen wurde und wie weit dies dem vordefinierten Toleranzbereich entspricht. Diese Anwendung wird bereits in dem Patent von *Olympus* beschrieben [LLSLH15]. Eine weitere Option zur Darstellung eines Prüfplanes wäre es, ein gängiges Verfahrensmuster zu benutzen. Dieses wird in Abhängigkeit zuvor definierter Parameter wie Prüfkopfgröße, Größe des Arbeitsbereiches oder Toleranz generiert.

Einzeichnung des bereits abgefahrenen Weges – DRAW Um festzustellen, ob beim Prüfungsvorgang keine Prüflücken entstehen, lässt sich die bisher abgefahrte Spur auf der virtuellen Oberfläche des Prüfstücks einzeichnen.

Um die Vorteile beider Modi zu verwenden, können sie zu einer hybriden Ansicht kombiniert werden.

4.3 Anforderungen

Für die manuelle Ultraschallprüfung ist vor allem eine gute Vorstellung nötig, wie der Schall sich zum aktuellen Zeitpunkt im untersuchten Prüfstück ausbreitet. Diese Vorstellung wird durch eine gute Vorstellung der Position des Prüfkopfes unterstützt, welche von der Montierung des Prüfkopfes an dem Trackingsystem abhängt. Um die Transformationsdaten des Ultraschall-Prüfkopfes sowie die des darstellenden Displays zu erfassen, wird ein Trackingsystem benötigt, welches in der Lage ist in 6 Freiheitsgraden zu tracken. Dieses sollte nicht elektromagnetisch beeinflussbar sein. Kleine Bewegungen des Prüfkopfes können große Auswirkungen auf das Ultraschall-Signal und die zugehörigen Visualisierungen haben. Eine exakte Genauigkeitsanforderung an das Trackingsystem liegt nicht vor, jedoch kann eine Millimetergenauigkeit für die Anwendung als ausreichend angenommen werden. Die Dimensionierung des Gesamtsystems ist im Idealfall variabel, sodass es sowohl in einer kleinen Prüf-

situation, z.B. am Tisch, als auch in größeren Szenarien, z.B. außerhalb des Labors am Großrohr, verwendet werden kann. Ob die Genauigkeit in den unterschiedlichen Situationen durch z.B. den Abstand der Trackingkomponenten beeinflusst wird, gilt es zu untersuchen.

4.4 Wahl des Systems im Fall der Anwendung bei Salzgitter Mannesmann Forschung

Zur Darstellung der gewonnenen Informationen ist ein variabler Größenaufbau von Vorteil (Abschnitt 5.2.1). Ein Aufbau des Systemes bei Großrohren entspräche einem Arbeitsbereich von mehreren Metern Durchmesser, was die *Oculus Rift* als HMD ausschließt. Mit Hilfe einer Stereokamera wie dem *ZEDmini* lässt sich das HMD der *HTC VIVE* zu einem Video-HMD umrüsten, um eine AR-Anwendung zu ermöglichen. Im Gegensatz zur *Microsoft HoloLens* ist das Outside-In-Tracking der *HTC VIVE* an festen Punkten um das Prüfstück positionierbar, sodass die Präzision des Prüfkopf-trackings konstant bleibt und nicht von der Kopfposition abhängig ist. Bei einer Implementierung mit Hilfe von *Microsoft HoloLens* und *Microsoft MR* bezieht sich das Tracking zudem auf das HMD und nicht auf das Prüfstück. Die Verwendung des *VIVE* Systems hat zudem den Vorteil robuste und verhältnismäßig leicht zu erweiternde Controller zu haben, um eine Befestigung des Prüfkopfes anzubringen (Tabelle 3.2). Des Weiteren ist eine Einbindung des *VIVE Trackers* möglich, welcher durch den kleineren Formfaktor eine noch kompaktere Prüfkopfhalterung ermöglicht. Im Fall der bei *Mannesmann Salzgitter Forschung* durchgeführten Prüfungen liegt in der Regel kein Prüfplan vor, weshalb hier ein nach dem DRAW Prinzip aufgebautes System gut anwendbar ist.

5 Implementierung

5.1 Tracking des Prüfkopfs

Das Tracking des Prüfkopfs erfolgt durch eine selbst erstellte Halterung (Abbildung 5.1), welche es ermöglicht, den Prüfkopf an einem *VIVE*-Tracker zu befestigen. Der Prüfkopf ist durch Schrauben in einer Klemme eingespannt, welche in einer festen Position relativ zum *VIVE*-Tracker angebracht ist. In *Unity* wird das kontinuierliche Offset durch eine hierarchische Sortierung des Prüfkopfs als *Child-Objekt* des Trackerobjekts erreicht.

5.2 Erfassung des Prüfstücks

Zu Beginn der AR-unterstützten Prüfung erfolgt eine Einmessung des Prüfstücks in das Koordinatensystem der Anwendung. Diese Einmessung wird in mehreren Schritten durchgeführt. Als Erstes muss die allgemeine Geometrie im Raum erkannt werden. Im nächsten Schritt wird das Koordinatensystem eingemessen, welches die Position und Lage bezüglich der Achsen der an das US-Gerät übermittelten Daten festlegt. In der Anwendung, die im Rahmen dieser Bachelorarbeit programmiert wurde, ist der Einmessvorgang für flächige Prüfstücke implementiert worden.

5.2.1 Erfassung der räumlichen Lage des Prüfstücks

Die Geometrie des Prüfstücks (Fläche, Zylinder,...) wird hierbei als bekannt vorausgesetzt. Die physischen Punkte, an denen die Abtastwerte ermittelt werden, sollten im möglichst direkten Kontakt mit dem Prüfstück stehen. Daher bietet sich z.B. die Mitte der Oberfläche des US-Prüfkopfs als Kontaktpunkt an. Durch Abfahren der Oberfläche werden Punkte der Oberfläche in vordefinierten Mindestabständen zum vorherigen Messpunkt aufgezeichnet. Aus der Punktwolke wird nun die räumliche Lage



Abbildung 5.1: Am Tracker befestigte Prüfkopfhalterung mit eingespanntem Phased-Array-Prüfkopf (auf der Seite liegend).

des Prüfstücks durch einen Fitting-Algorithmus errechnet. In *Unity* werden Bleche durch Ebenen und Rohre durch Zylinder¹ repräsentiert. Der Prüfkopf sollte immer Kontakt zum Prüfstück haben, um die Grundlage für ein präzises Ergebnis zu liefern.

5.2.2 Fitting des virtuellen Prüfstücks in Punktwolke

Das Fitting erfolgt durch das Optimieren der räumlichen Lage und Orientierung einer vordefinierten Geometrie. Diese Geometrie wird in Form eines als Vektor vorliegenden Parametersatzes beschrieben. Das Ziel des Fittings ist es, die Summe aller Quadrate der Abstände $f(i)$ der Geometrie zu den Messpunkten zu reduzieren (Formel 5.1).

$$\min \sum_i (f(i))^2 \quad (5.1)$$

5.2.3 Das Downhill-Simplex Verfahren

Zur Variation der Funktionsparameter wird der von John Nelder und Roger Mead entwickelte Algorithmus verwendet (Listing `reflst:downhillSimplex`). Dieser verwendet zum Finden der besten Parameter das mathematische Simplex Konstrukt. Jede Ecke des Simplex repräsentiert einen Parametersatz, für den die Zielfunktion ausgewertet wird. Der Algorithmus ist in der Lage, Parametersätze (Simplex-Ecken) verschiedener Dimensionen zu optimieren, was ihn unter anderem für das Fitten der Parameter von verschiedenen dreidimensionalen Formen geeignet macht. Die Implementierung basiert auf einem Teil der MATLAB Funktion `fminsearch` [Mat] und einer Beschreibung des Algorithmus in dem Artikel *Use of Nelder-Mead simplex method to arc fitting for railway track realignment* [SSCR14].

Die Zielfunktion als Qualitätsberechnung

Im Laufe des Algorithmus wird mehrfach die Qualität neuer oder bereits bestehender Ecken berechnet. Diese Qualität stellt im Fall der Optimierung eines dreidimensionalen Objektes auf eine Punktwolke den Abstand nach der Methode der kleinsten Quadrate (Formel 5.1) dar. Die Errechnung des Abstandes selbst erfolgt mit Hilfe einer Entfernungsfunktion, die von der Art der Berechnung

¹Da in *Unity* auch die Zylinder auf Polygonen basieren, wird ein 3D-Modell mit einer hohen Oberflächenunterteilung in *Faces* verwendet.

sowie der geometrischen Form abhängig ist.

In der Implementation wurde die Geometriefunktion für das Fitting von Flächen implementiert. Der Abstand $f(i)$ eines Punktes \vec{s}_i zur Ebene mit der Normalen \vec{n} und der Distanz vom Ursprung des Welt-Koordinatensystems d wird mit Hilfe des Skalarprodukts \cdot berechnet (Formel 5.2).

$$f(i) = \vec{s}_i \cdot \vec{n} - d \quad (5.2)$$

```
public class DownhillSimplex{
    float requiredQuality;
    int maxIterations;

    List<VectorN> simplex;

    public void SetupNelderMead(VectorN initialeParameter){
        // vary initial parameters component-wise and create simplex from n+1 vertices
    }

    public void Iterate(){
        while(finished == false){
            simplex.SortByQuality();

            // calculate average vertex
            // calculate reflected vertex

            if( GetQuality(reflectedParameterset) < GetQuality(simplex.best) ){
                // calculate expanded vertex
            } else if( GetQuality(reflectedParameterset) <
                GetQuality(simplex.secondWorst) ){
                // calculate contracted vertex
            } else {
                // calculate shrink vertex
            }

            // check if finished
            if( iterations > maxIterations || GetQuality(simplex.best) <
                requiredQuality){
                finished = true;
            }
        }
    }

    // TargetFunction
    public float GetQuality(VectorN parameterSet){
        float quality = LeastSquare(OffsetToGeometry);
    }
}
```

```
    return quality;
}
}
```

Listing 5.1: Downhill-Simplex Algorithmus in C#-Pseudocode

Wahl der initialen Simplexparameter

Der Algorithmus wird mit einem initialen Parametersatz aufgerufen, welcher anhand simpler Berechnungen bestimmt wird². Die Variation der Ecken erfolgt mit Hilfe eines Simplex, welcher $n + 1$ Ecken in einer Liste enthält. Da keine Ecke gleich sein darf, werden die Startparameter leicht variiert (Abbildung 5.2). Die Qualität der Startparameter wirkt sich mitunter stark auf die Effizienz der Optimierungsiterationen und das Ergebnis aus; der genaue Einfluss ist jedoch abhängig von der Wahl der Zielfunktion.

Iterationsweise Verbesserung der Simplexparameter

In mehreren Durchgängen wird durch den Algorithmus versucht, die schlechteste Ecke im Simplex durch eine bessere zu ersetzen, sodass sich alle Werte dem Optimum annähern. Zu Beginn jedes Iterationsdurchgangs werden die Ecken im Simplex mit Hilfe der Zielfunktion ihrer Qualität nach geordnet. Darauf folgend werden mit Hilfe von Vektoroperationen neue Ecken erzeugt, wie beispielsweise eine reflektierte Ecke, eine geschrumpfte Ecke oder eine expandierte Ecke. Die neu generierten Werte werden vor dem Einfügen in den Simplex in ihrer Qualität durch die Zielfunktion ausgewertet und falls sie eine bessere Qualität haben, in diesen aufgenommen. Die Iteration läuft so lange, bis eine Mindestqualität oder ein Maximum an Iterationen erreicht ist.

5.2.4 Einmessung des Koordinatensystems auf dem Prüfstück

Nachdem die Geometrie und Lage des Prüfstücks im Raum eingemessen ist, muss der Ursprung und die Lage des Koordinatensystem festgelegt werden. Hierzu wird der getrackte Prüfkopf an einen Punkt auf dem Prüfstück positioniert und eine Taste zum festlegen betätigt. Nach demselben Prinzip erfolgt das darauf folgende Einmessen der X-Achse. Damit bei einer erneuten Vorlage des Prüfstücks die

²Im Fall einer Ebene wird beispielsweise die Normale aus dem Skalarprodukt zweier Vektoren zwischen Punkten, welche auf dieser Ebene liegen, errechnet.

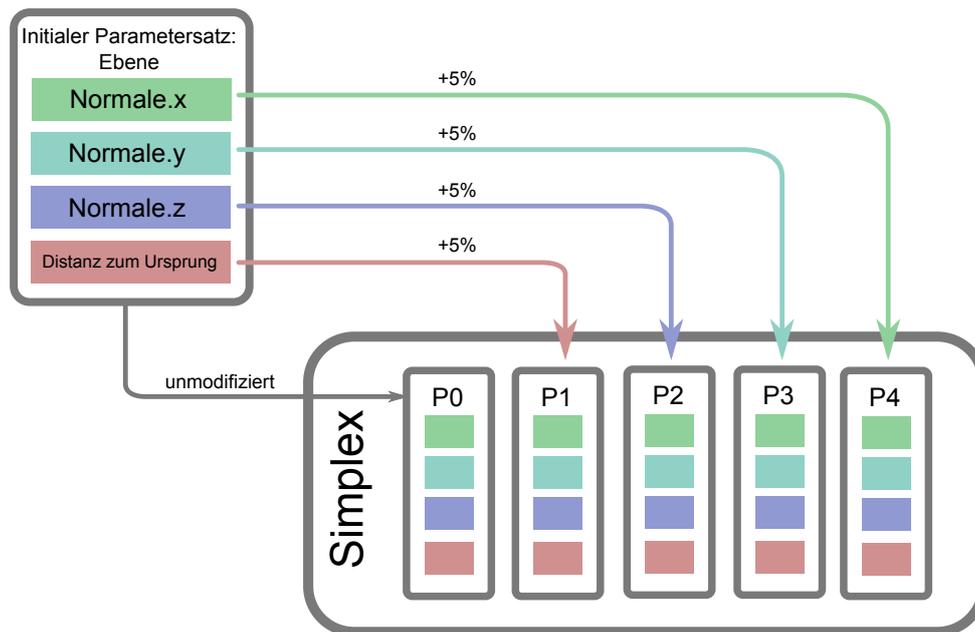


Abbildung 5.2: Erzeugung des initialen Simplex aus Startparametern

Positionswerte identisch mit den vorherigen sind, sollten Ursprung und X-Achse auf dem physischen Prüfstück z.B. mit Lackstift markiert werden.

5.3 Darstellung der Trackingdaten

Die erfassten Trackingdaten werden vom SteamVR-Asset in *Unity* empfangen und auf virtuelle Objekte übertragen. Mit Hilfe von C#-Scripten werden die Transformationsdaten in das jeweilige Koordinatensystem des Prüfstücks transformiert. Eine Visualisierung der Position auf dem Prüfstück erfolgt nach dem DRAW Prinzip (Abschnitt 4.2). Dies wird durch Bearbeiten der Oberflächentextur des Prüfstücks zur Laufzeit erreicht.

5.4 Speicher- und Navigationsfunktion

Es kommt vor, dass ein Prüfstück mehrfachen Prüfungen unterzogen wird, welche an unterschiedlichen Orten oder zu unterschiedlichen Zeiten stattfinden. Um auffällige Stellen auf dem Prüfstück beim nächsten Vorliegen wieder zu finden, gibt es die Funktion, einen bestimmten Punkt per Knopfdruck zu markieren. Die Stelle auf dem eingemessenen Koordinatensystem wird in einer `.csv` Datei gespei-

chert. Zu einem späteren Zeitpunkt kann diese geöffnet werden und erscheint als Augmentierung in Form einer Markierung an der gespeicherten Stelle auf dem neuen Koordinatensystem. Eine Voraussetzung hierfür ist das reproduzierbar gleiche Einmessen des Arbeitsbereiches auf dem Prüfstück. Dies könnte durch eine Markierung von Ursprung und X-Achse auf dem Prüfstück unterstützt werden. Das Speichern der Prüfkopfposition ist auch kontinuierlich möglich, was beispielsweise eine Dokumentierung des Prüfvorgangs möglich macht.

5.5 Übertragung der Trackingdaten

Damit die Daten für die Weiterverarbeitung verwendet werden können, werden diese als Pakete in TCP/IP an den die Ultraschalldaten verarbeitenden Rechner geschickt. Bisher existiert für die Übertragung von Positionsdaten kein IP-basiertes Protokoll. Alternativ zum Design eines eigenen Übertragungsprotokolls gibt es die Option, die Übertragung mit Hilfe des *Open Sound Protocol* (OSC) zu realisieren.

Realisierung mit selbst erstelltem Protokoll über TCP/IP

Eine Implementierung, welche nicht auf einem standardisierten *Session Layer* Protokoll basiert, soll einfach in die bestehende Ultraschallsoftware zu implementieren sein. Die Trackingwerte werden in das Koordinatensystem des Prüfstücks übertragen und in Integer-Werte, welche sich auf Mikrometer beziehen, umgewandelt. Alle ermittelten Parameter (Tabelle 5.1) werden als ASCII-Zeichen codiert, bevor sie an den TCP-Client geschickt werden. Mit Hilfe des .NET Frameworks wurde ein Client *TCP-Socket* in *Unity* erstellt, welcher die Daten mit einem selbst definierten Protokoll an die Ultraschallsoftware überträgt.

Byteposition	Datentyp ^a	Funktion	Beispiel	Beispiel Interpretiert
0 bis 2	Integer	Nachrichtenart	001	Pos. auf Blech
3 bis 6	Integer	Protokollversion	0001	1. Version
7	Boolean	Ist auf Prüfstück	1	PK auf Prüfstück
8 bis 31	Vektor3 ^b	Lokale Position ^c in μm	+00004018	(nur X) +4,018 mm
32 bis 55	Vektor3	Globale Position in μm	-0023041	(nur X) -23,041 cm
56 bis 60	Vektor3 ^d	Lokale Euler-Rotation	00005	(nur X) °5
56 bis 60	Vektor3	Globale Euler-Rotation	00023	(nur X) °23

^aNach Interpretation der ASCII-Zeichen

^b7 Zeichen je Zahl mit Vorzeichen: 0 für negatives Vorzeichen; 1 für positives.

^cPosition im Bezug auf den Ursprung des Prüfstücks

^d5 Zeichen je Zahl

Tabelle 5.1: Datagram des selbst definierten Protokolls für ein flaches Prüfstück

6 Auswertung

6.1 Auswertung der Genauigkeit des VIVE Tracking Systems

Die Positionsgenauigkeit des verwendeten *VIVE*-Trackingsystems hängt von verschiedenen Faktoren ab: Abstand und Orientierung der Basisstationen zum Prüfstück, Größe des Trackers und Verdeckung von Sensoren auf dem Tracker. Die Genauigkeitsprüfung des *VIVE*-Trackingsystems wurde mit einem X-Y-Scanner (verfahrender Automat) durchgeführt, welcher sonst für die automatisierte Durchführung von US-Scans benutzt wird. Der Tracker wurde mit Hilfe einer speziell angefertigten Vorrichtung an der Verfahreinheit des Scanners befestigt. Während des Verfahrens des Scanners wurde die dreidimensionale Position des Trackers kontinuierlich aufgezeichnet. Als Verfahrensmuster wurde ein Kamm-Muster ausgewählt, da dieses im Gegensatz zu einem mäandernden Muster weniger Überschwingungstoleranz hat. Die erwartete Genauigkeit liegt aus Nutzungserfahrung sowie Positionsangaben im *Unity*-Editor im Bereich von etwa 2 mm.

Versuchsaufbau

Der *VIVE*-Tracker wurde mit einer gefrästen Halterung an der Halterung des Scanners mit einer Orientierung nach oben befestigt. Daneben wurden die Basisstationen so aufgestellt, dass sie den gesamten Scanbereich „ausleuchten“ (Abbildung 6.1 und Abbildung B.4). Der Versuchstisch war durch das normale Raumlicht von Leuchtstoffröhren beleuchtet; die Fensterblenden waren nur leicht geöffnet, um beeinflussende IR-Strahlung der Sonne zu reduzieren und somit möglichst störungsfreie Versuchsbedingungen zu erzeugen, obwohl sich während der vorherigen Entwicklung des Systems keine Schwierigkeiten zeigten. Um mögliche Reflektionen der IR-Laser der Basisstationen am Boden der Wanne unter dem Scanner auszuschließen, wurde diese mit diffusem Handtuchpapier ausgelegt. In die Wasser-

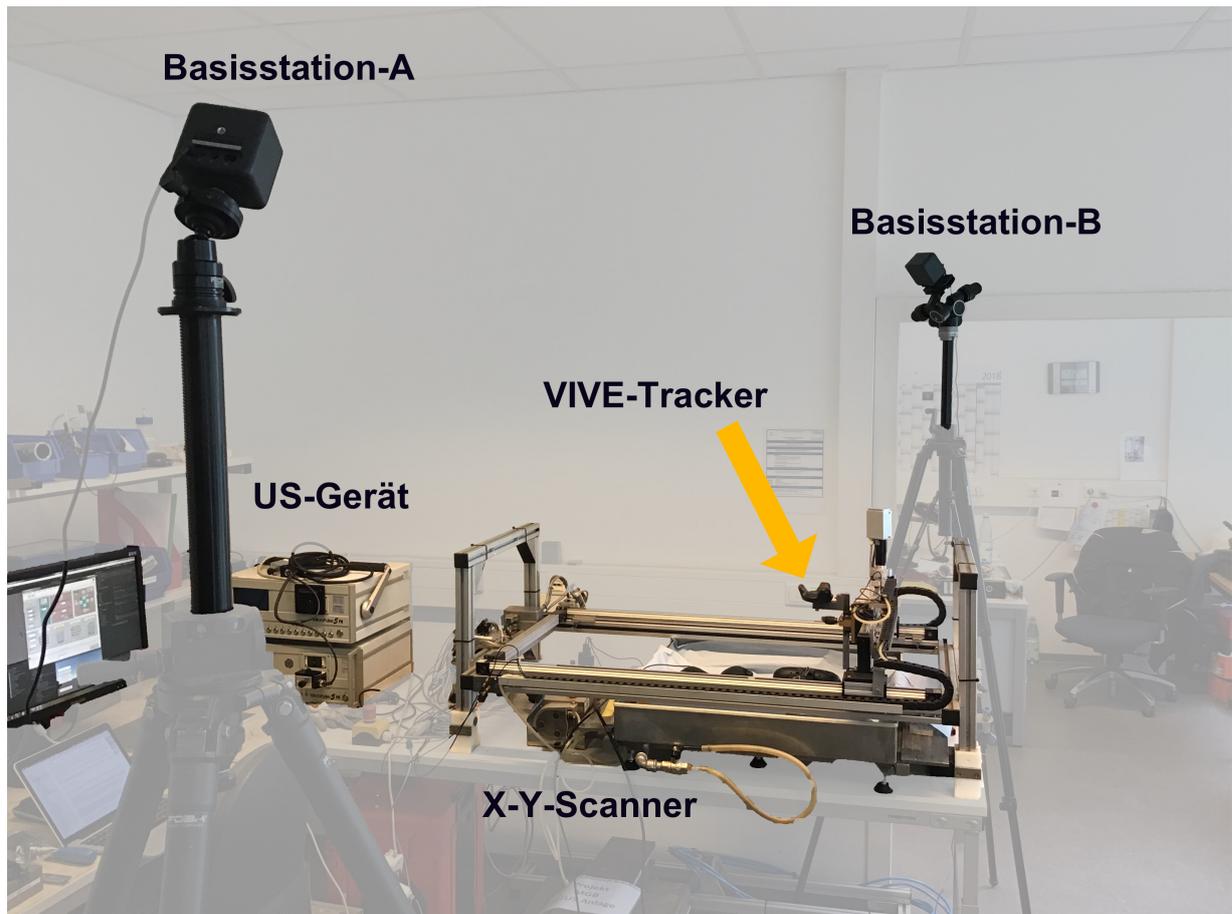


Abbildung 6.1: Versuchsaufbau der Präzisionsmessung

wanne wurden die weiteren eingeschalteten und getrackten *VIVE*-Komponenten (HMD, Controller) gelegt, um eine Referenz zwischen den Komponenten innerhalb der SteamVR Software zu ermöglichen.

Versuchsdurchführung

Die von der SZMF erstellte Steuerungslogik bietet die Möglichkeit eine rechteckige Fläche entweder in einem mäandernden Muster oder in einem kammförmigen Pfad abzufahren. Das Kamm-Muster wurde so modifiziert, dass der Tracker an jedem Eckpunkt des Musters für zwei Sekunden stehen bleibt und so mehrere Positionswerte für diese Stoppunkte aufzeichnet (Abbildung B.1). Bevor das Verfahren des Scanners gestartet wurde, ist die Positionsaufzeichnung gestartet worden. Dadurch entstand zu Beginn jedes Scandurchgangs ein Stillstand am Nullpunkt, welcher als Referenz dient.

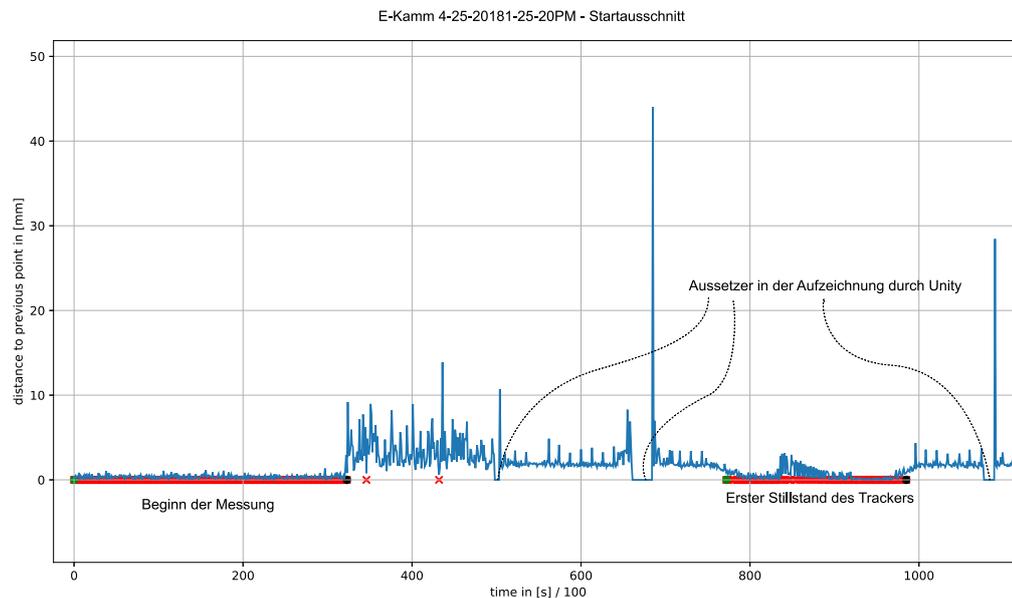


Abbildung 6.2: Ausschnitt zu Beginn einer Abstandsmessung als E-Kamm. Zu erkennen sind Stillstand zu Beginn, zwei Ausreißer und der erste Stillstand des Trackers

Versuchsauswertung

Die Scandaten wurden mit Hilfe von *Python*-Skripten in mehreren Schritten ausgewertet. Zuerst wurde der Abstand aller Scanpunkte zu ihren Vorgängern bestimmt. In einer graphischen Darstellung dieser Abstände lassen sich die Scanpausen, welche zu Beginn und am Ende jeder Reihe eingelegt wurden, erkennen (Abbildung 6.2).

An manchen Stellen finden sich Ausreißer, welche zum Teil wesentlich größere Werte als alle anderen haben. Diese Ausreißer lassen sich durch kurzzeitige Performance-Aussetzer während der Aufzeichnung in *Unity* erklären. Für mehrere (Milli-)Sekunden zeichnete die Software keine Position auf. In der Zeit bewegte sich der Scanner mit dem *VIVE*-Tracker weiter und erzeugt einen verhältnismäßig großen Abstand zum letzten Aufzeichnungspunkt. Im nächsten Schritt wurden die Stellen im Signal identifiziert, an welchen der Scanner still stand. Diese wurden zu einem Durchschnittswert zusammengefasst und mit einem Index versehen. Der Startpunkt des Scanners konnte nicht einheitlich gelegt werden, da die Verfahrenheit des Scanners zwischen manchen Messungen manuell neu positioniert werden musste. Da das Koordinatensystem des Scanners zwischen den

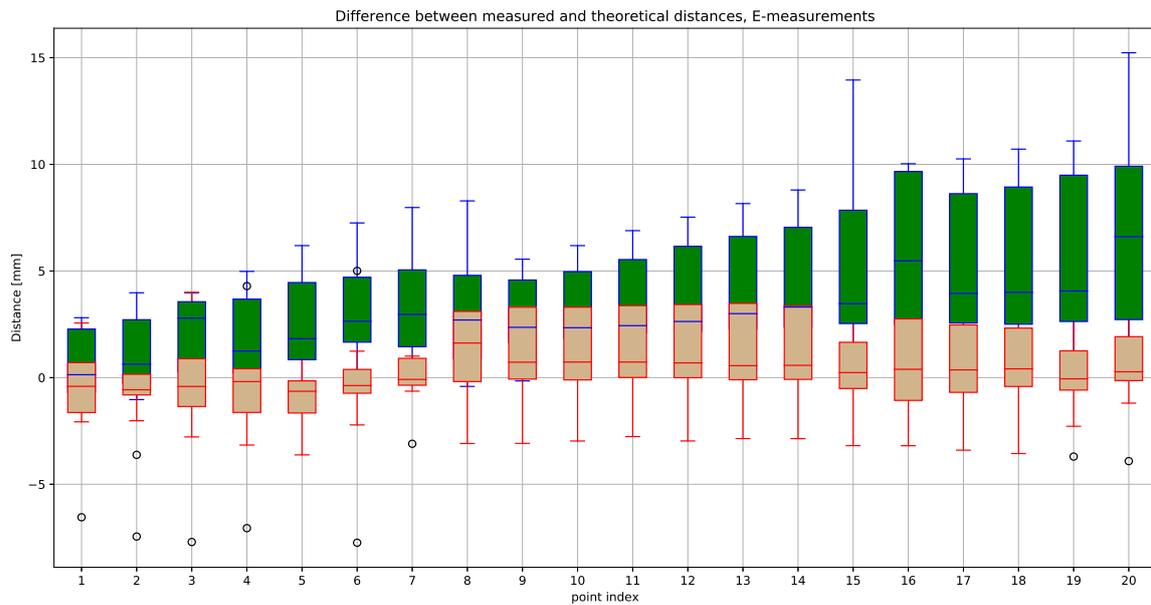


Abbildung 6.3: Differenz zwischen den gemessenen Positionen und berechneten Soll-Positionen von 16 E-Kamm Messungen. Blau/Grün sind linke, rote Boxplots die rechten, der Basisstation nähere, Positionen.

verschiedenen Messungen nicht einheitlich ist¹, kann nicht direkt die tatsächliche Position mit der Soll-Position verglichen werden. Als Vergleichswert wird der Abstand aller Punkte zum Stillstand zu Beginn der Messung ermittelt und mit dem Abstand der Soll-Positionen zum Nullpunkt verglichen.

In der Auswertung zeigt sich ein deutlicher Unterschied in der Qualität zwischen der rechten und linken (Abbildung 6.3), bzw. vorderen und hinteren Messpunktreihe (Abbildung 6.4). Punkte, welche näher an der vorderen, linken Ecke der Aufzeichnungsfläche liegen haben eine Genauigkeit, die im Durchschnitt etwa bei 1–2 mm Abweichung hat, wohingegen bei basisstationsnahen Positionen deutliche Fehlerwerte von bis zu 19 mm auftreten. Dieser Unterschied ist durch die Position der Basisstationen zu erklären, da Basisstation-B an der hinteren, rechten Ecke mit den schlechten Differenzwerten nicht optimal positioniert wurde (Abbildung 6.1). Sie befand sich aus Platzgründen sehr nah am Scanner und hatte eine nicht ausreichende Neigung. Außerdem ist es wahrscheinlich, dass Vibrationen der Scanner-Motoren die IMU des Trackers beeinträchtigt hat, was sich auch in der Debug-Visualisierung während der Scanaufnahme zeigt (Abbildung B.3). Diese Vibrationen treten

¹Das Koordinatensystem des VIVE-Trackingsystems ist zwischen allen Messungen konstant.

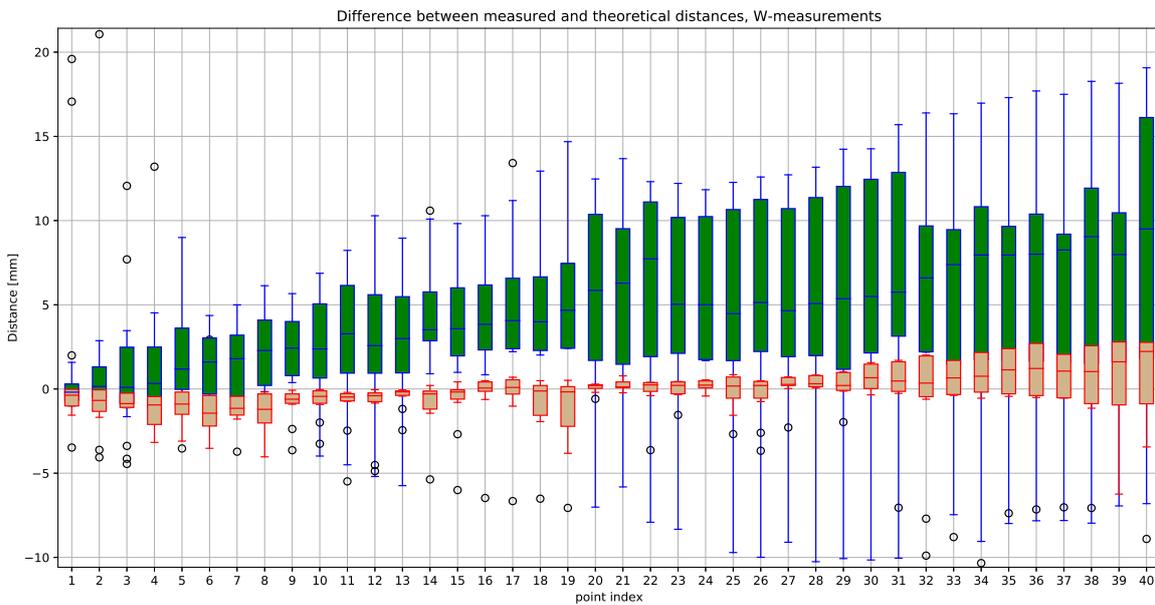


Abbildung 6.4: Differenz zwischen den gemessenen Positionen und berechneten Soll-Positionen von 14 W-Kamm Messungen. Rote Boxplots sind vordere, blau/grüne hintere, der Basisstation nähere, Positionen.

an unterschiedlichen Positionen auf dem Scanner unterschiedlich stark auf.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die Positionsgenauigkeit des *VIVE*-Trackingsystems für die Positionsbestimmung im Einsatzfeld manueller US-Prüfung bei vollständiger Ausleuchtung durch die Basisstationen ausreichend ist. Die roten Positionen befinden sich (mit Ausnahme von Werten größer als Index 30 in Abbildung 6.4) in einem gut ausgeleuchteten Bereich mit realistischen Basisstationsabständen. Die hier erreichte Genauigkeit von 1–2 mm liegt bei den erwarteten 2 mm Genauigkeitsschwankungen. Als zusätzliche Erkenntnis lässt sich feststellen, dass richtige Position und Orientierung der Basisstationen eine wichtige Voraussetzung für hinreichend gute Werte sind.

Verbesserungsvorschläge für die Auswertung

Weitere mögliche Auswertungsmöglichkeiten bestehen im Vergleich der Genauigkeit bei verschiedenen Abständen der Basisstationen vom Tracker, um verschiedene Anwendungssituationen darzustellen. Auch könnten Umwelteinflüsse, wie Beleuchtung und Vibrationen variiert werden um die Resilienz in schwierigen Anwendungsbedingungen zu überprüfen. Die Genauigkeit der Messungen ließe



Abbildung 6.5: Versuchsaufbau für die Erstellung eines C-Scans mit der erstellten Anwendung

sich durch einen noch vibrationsärmeren Versuchsaufbau erhöhen. Dies könnte man mit Hilfe einer Dämpfung des Trackers erreichen. Als alternative Referenz zum Positionieren durch den Scanner ließe sich ein anderes Trackingsystem verwenden, von dem die höhere Genauigkeit bekannt ist.

6.2 Erstellung eines C-Bildes mit der erstellten Anwendung

In diesem Versuch wird das praktische Ergebnis des Systemes getestet. Die beiden Basisstationen wurden in einem Abstand von jeweils ca. 80 cm vom Prüfstück aufgestellt und direkt in dessen Richtung orientiert (Abbildung 6.5).

Der C-Scan wurde mit einem Phased Array Kopf durchgeführt, welcher geneigt an der Prüfkopfhalterung befestigt wurde. Diese Neigung wurde auch in der *Unity*-Anwendung als Transformation vorgenommen, um eine korrekte Positionierung zu ermöglichen. Im Ergebnis (Abbildung 6.6) lässt sich eindeutig die runde Form beider Testbohrungen erkennen. Die schräge Fixierung des

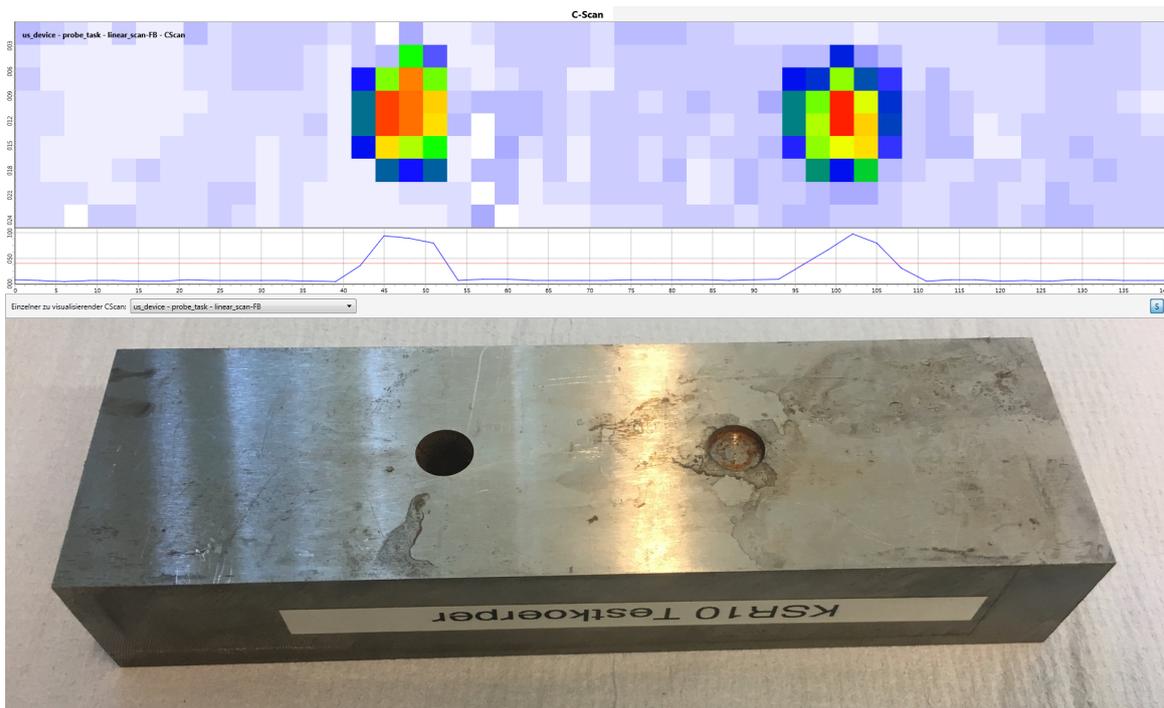


Abbildung 6.6: Durch *VIVE*-Trackingdaten erstellter C-Scan (Gitterweite 3 mm) mit zugehörigem Prüfstück (umgedreht)

Prüfkopfes stellte eine Schwierigkeit dar, da die Gewinde in der gefrästen Prüfkopfhalterung nur wenige Fixierpunkte hatten.

Zudem lässt sich feststellen, dass auch auf einem Prüfstück dieser geringen Größe (14,4 x 2,7 cm) eine Positionsbestimmung sehr gut funktioniert. Der Prüfkopf konnte reproduzierbar an Positionen auf dem Prüfstück einen vergleichbaren Wert liefern, was räumlich korrekt getrackt wurde. In weiteren Versuchen ließe sich feststellen, wie klein die minimal erfassbare Gittergröße ist. Aus dem Genauigkeitsversuch (Abschnitt 6.1) lässt sich vermutlich ein Gitter bis ca 2 mm wählen.

6.3 Beurteilung der physischen Eignung des *VIVE*-Systems an realistischen Einsatzorten

Die bisher verwendete *VIVE*-Hardware wurde unter Rahmenbedingungen ausgewählt, welche es ermöglichen einen möglichst flexiblen Prototypen zu erstellen. Diese können für den Einsatz z.B. in ei-

ner Produktionshalle anders sein. Allgemeine, das Tracking beeinflussende Umgebungsbedingungen in Werken sind:

- Schmutz und Feuchtigkeit, insbesondere wenn diese sich ablagern. Hier ist die naheliegendste Lösung die Isolation der Sensorik in Form von Gehäusen.
- Platz, der nicht zur Verfügung steht, da beispielsweise Rollgänge oder Hebewege für Kräne freigehalten werden müssen. Durch entsprechende vorhergehende Planung kann diesem Problem jedoch begegnet werden.
- Licht, welches den Einsatzort ungleichmäßig beleuchtet. Bei Systemen, welche IR-Licht verwenden (beispielsweise *VIVE* und *Optitrack*) können streuende Infrarotstrahlung bzw. Wärmequellen in der Nähe ein Problem darstellen. Bei der Entwicklung des Systems in einem Arbeitsumfeld mit Fenstern und teilweise starker Sonneneinstrahlung gab es diesbezüglich keine Probleme.

6.4 Auswertung der potentiellen Problematik des Auseinanderlaufens von Signalwegen

Da das gesamte AR-US-System bei einer Messung aus mehreren unterschiedlichen Komponenten besteht (Abbildung 4.1), kann es durch Verzögerungen in der Zeitmessung in einem der Systeme, zum Beispiel des Tracking-Rechners und des US-Rechners, zu einem Auseinanderlaufen der zusammengehörenden Werte kommen. Verzögerungen im System können auf dem Weg der Positionserfassung, US-Datenverarbeitung und der Übermittlung der Trackingdaten entstehen.

6.5 Auswertung des erstellten Anwendungsprotokolls

Das Protokoll, welches für das Senden der Daten an den die Ultraschalldaten verarbeitenden Rechner genutzt wurde (Datagramm siehe Tabelle 5.1), ist unter Gesichtspunkten der schnellen Implementierung auf Seiten des US-Rechners erstellt worden. Vorausgesetzt, dass kein Einsatz eines anderen, bereits existierenden Protokolls möglich ist, lassen sich einige Aspekte verbessern. Das Protokoll beinhaltet Dopplungen, die darauf basieren, dass noch nicht komplett beschlossen ist, welche Komponente

bestimmte Aufgaben am Ende übernehmen soll. So wird die Z -Position² von der *Unity*-Anwendung ausgewertet und auf die Information, ob sie innerhalb eines Toleranzbereichs liegt, reduziert übertragen.

Die übermittelte Datenmenge ließe sich durch die Implementierung eines vorgeschalteten Filters reduzieren. Dieser könnte erst ab einer festgelegten Entfernung zum letzten Punkt die Positionsänderung senden. Eine weitere Ergänzung zum Protokoll wäre die Implementierung eines Zeitstempels, der eine asynchrone Zuordnung der Positionswerte zu den Ultraschalldaten ermöglicht.

6.6 Auswertung der Qualität des ZEDmini als AR-Kamera

Zur Auswertung der Latenz des ZEDmini wurde mit einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme des HMD internen Displays gefilmt. Die dabei beobachtete Verzögerung zwischen gefilmtem Tracker und computergeneriertem Inhalt betrug 80 ms. Bei der Überlagerung des Kamerabildes mit AR Inhalten kommt es zu Darstellungsproblemen, wenn die Positionen von realer Fläche und virtuellem Inhalt sehr nah aneinander liegen. Dies liegt daran, dass aus dem Stereobild das Tiefenbild (Z -Bild) errechnet wird, welches wiederum für die Generierung einer Maske für den AR-Inhalt dient. Im Fall der Anwendung passiert dies beim Überlagern der Prüfstückebene mit dem gemalten Pfad. Bei Betrachtung des Tiefenbildes und des mit AR-Inhalten kombinierten Kamerabildes lässt sich feststellen, dass die Qualität der Tiefeninformation mit zunehmender Entfernung von der Brille abnimmt. Das wirkt sich dadurch aus, dass die Fläche mit den Prüfkopfmarkierungen bei ca. 1 m Entfernung von der Brille nicht mehr das Prüfstück überlagert, sondern es zu einem Entfernungskonflikt auf der Oberfläche kommt (Abbildung 6.7).

6.7 Abschließende Evaluation der erstellten Augmented-Reality Anwendung

Das *VIVE*-Trackingsystem bietet durch seine verhältnismäßig geringen Kosten und gute Einbindung in populäre Spieleengines eine sehr gute Basis für das schnelle Erstellen von Prototypen (*Rapid prototyping*) und lässt sich auch in Teilen produktiv einsetzen. Die erstellte Anwendung hat derzeit

²Entfernung des Trackers von der Ebene

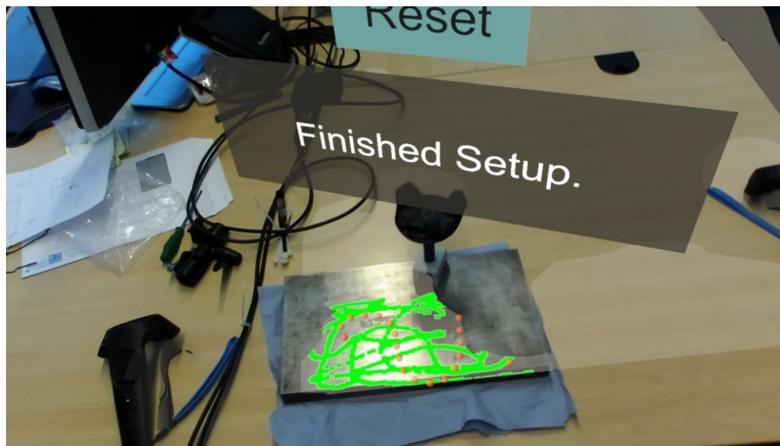


Abbildung 6.7: AR-Ansicht der Anwendung. Fehlerhafte Oberflächenerkennung gut sichtbar.

hohe Hardware-Anforderungen; insbesondere durch das *ZEDmini* als separate Stereokamera und die leistungsfähige Grafikkarte, welche für das *VIVE*-System benötigt wird (siehe Tabelle 3.2). Diese Situation kann sich jedoch durch zukünftige Hardwaregenerationen, wie zum Beispiel die *VIVE Pro*³ mit integrierter Stereokamera, vereinfachen.

Um die entwickelte Anwendung für den produktiven Einsatz weiterzuentwickeln, bedarf es neben Sicherheitsstudien auch weiterer UI-Studien. Soll die Anwendung beispielsweise bei der Untersuchung von großen Blechen Anwendung finden, wäre eine AR-Darstellung über eine Projektion auf das Prüfstück oder eine Visualisierung im Tablet wahrscheinlich sinnvoller als eine Visualisierung im HMD.

Des Weiteren ist die Genauigkeit und Effizienz des Downhill-Simplex Algorithmus zu untersuchen. Als Alternative kommen andere statistische Verfahren infrage, die auf die speziellen zu fittenden Geometrien zugeschnitten sind.

³<https://www.vive.com/de/product/vive-pro/> besucht: 9. Mai 2018

7 Ausblick

7.1 Weitere mögliche Anwendungen

7.1.1 Weitergabe der Trackingdaten per Encoderpulse zur Erstellung von C-Bildern

Abgesehen von der Verwendung der Trackingdaten für eine Darstellung in einer AR-Anwendung, könnten die Trackinginformationen für die Generierung von Encoderpulsen verwendet werden. Die inkrementelle Positionsänderung würde aus der Position berechnet und direkt über quadraturmodulierte Signale an das Ultraschallgerät gesendet werden, welches mit Hilfe dieser Signale ein C-Bild berechnen würde. Diese Anwendung erfordert Hardware, wie einen Arduino-Microcontroller, welcher in der Lage ist, die erforderlichen Spannungssignale zu erzeugen.

7.1.2 Echtzeit-Visualisierung des C-Bildes auf dem Prüfstück

Durch einen Rückkanal vom datenverarbeitenden US-Rechner zum AR-Rechner wäre es möglich die US-Signale sofort auf der Oberfläche des Prüfstücks als C-Scan darzustellen. Liegen dreidimensionale US-Messdaten vor, wäre auch eine Visualisierung innerhalb des Prüfstücks denkbar, was dann einem dreidimensionalen „Röntgenbild“ entsprechen würde.

7.1.3 Augmented-Reality Darstellung auf einem Tablet

Eine Darstellung der AR-Informationen in einem HMD kann aus praktischen und arbeitsschutztechnischen Gesichtspunkten nachteilig sein. Als Alternative könnte die Kamera eines Tablets für die Erstellung von AR-Anwendungen als *Magic Lens* [DBGJ13] genutzt werden. Das Tablet würde in der finalen Anwendung sowohl fest an einem Stativ befestigt, als auch mobil im Raum um das Prüfstück

bewegt werden, was unterschiedliche Anwendungsszenarien ermöglicht. Eine Anwendung auf dem Tablet wäre auch mit einem Marker erkennenden Toolkit wie *Vuforia* möglich, wodurch das externe Trackingsystem durch einen einfach auszudruckenden Marker ersetzt würde.

Unabhängig von der Frage des Messkopf-Trackings gibt es verschiedene Möglichkeiten, die generierten C-Bilder darzustellen. Hierbei ist das Szenario wichtig, in dem die Darstellung stattfindet.

Projektion Eine Projektion des Bildes auf das Prüfstück erfordert idealerweise einen nicht beweglichen Prüfaufbau, damit die Darstellung eingemessen und hoch aufgelöst projiziert werden kann. Für eine gute Qualität der Projektion wäre eine diffus reflektierende Oberfläche erforderlich. Sollte das Prüfstück bewegt werden, müsste ein Tracking des Prüfstücks stattfinden [MRDFH15]. Eine Anwendung dieses Trackings wäre beispielsweise bei der Prüfung von Blechen vorstellbar, welche zur Nachprüfung immer an der selben Stelle positioniert würden.

Anzeige im HMD Im Fall der Verwendung eines AR HMDs oder Tablets bestünde der Vorteil, dass Informationen dreidimensional im Raum dargestellt werden könnten. Dadurch könnten mehrere Informationen, wie der Weg des Schalls oder Messwerte selbst, gleichzeitig an ihrer korrekten Stelle im Raum angezeigt werden.

7.1.4 Visualisierung der Schallwege im Material

Eine anspruchsvolle Erweiterung der Anwendung wäre die Visualisierung der Wege, welche vom Schall im Material zurückgelegt werden. Anwendung könnte dies nicht nur in der Handprüfung finden, sondern auch bei der teilautomatisierten Prüfung. Befindet sich das Prüfstück in einer meist mit Wasser gefüllten Wanne, könnte eine AR-Visualisierung nicht nur die Schallwege darstellen, sondern bei Erfassung der Oberflächenhöhe des Kontaktmittels auch die korrekte Lichtbrechung in die Darstellung mit einbeziehen.

7.2 Fazit

Der Vorteil einer Erweiterung des US-Handprüfplatzes durch AR-Technologie liegt in der Positionsbestimmung des Prüfkopfes. In dieser Arbeit wurde durch Implementierung einer AR-Anwendung, die

der Unterstützung am US–Arbeitsplatz dienen soll, beschrieben, wie erste Funktionalität einer professionellen Anwendung aussehen könnte. Der Prüfpfad wird während der Untersuchung des Prüfstücks als AR–Inhalt auf dessen Oberfläche angezeigt. Eine Halterung, an der sowohl US–Prüfkopf, als auch der *VIVE*–Tracker befestigt sind, ermöglicht die exakte Positionsbestimmung des Prüfkopfs. In wie weit diese Markierung durch weitere Informationen wie Prüfkopfdrotation oder US–Werte sinnvoll ergänzt werden kann, gilt es in weiterer Forschung zu untersuchen. Durch die Markierung von Punkten auf der Oberfläche können auch auf größeren Flächen Stellen zur Folgeuntersuchung festgehalten werden, um sie später wiederzufinden. Die kontinuierliche Aufzeichnung der Position bietet das Potential einer genaueren Dokumentierung der Prüfung, wie sie zur Zeit in der praktischen Anwendung nicht erfolgt. Während der US–Messung wird die in das lokale Koordinatensystem transformierte Position des Prüfkopfes über eine Netzwerkverbindung an den Ultraschallrechner übertragen, wo mit ihrer Hilfe ein C–Bild generiert wird.

Teil der Implementierung ist das Einmessen des Prüfstücks in das entsprechende Koordinatensystem mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus. Des Weiteren wird die Position auf dem Prüfstück über ein selbst erstelltes Protokoll an die US–Software geschickt, wo sie mit den US–Daten zu einem C–Bild kombiniert wird.

In einem Versuch wurde die Genauigkeit des *VIVE*–Trackingsystems unter normalen Bedingungen auf ca. 1–2 mm bestimmt, was zwar nicht an die Auflösung eines Seilzugencoders mit unter 0,1 mm heranreicht, aber für die Positionierung der US–Werte in einem C–Scan ausreicht. Ein Teil der Messdaten zeigt große Ungenauigkeiten von bis zu 19 mm auf, was sich aber auf schlechte Positionierung der Basisstationen zurückführen lässt. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit einer guten Ausleuchtung des Arbeitsplatzes durch die Basisstationen, deren optimierte Positionierung noch ermittelt werden muss.

Insgesamt hat die hier beschriebene Technologie in vielen Aspekten das Potential ein Werkzeug in der Ultraschallprüfung zu werden. Damit sie jedoch produktiv in der Industrie eingesetzt werden kann, müssen die bereits genannten Anpassungen erfolgen und oben erwähnte Fragen geklärt werden.

8 Literaturverzeichnis

- [ADM17] Aurand, Alexander M., Jonathan S. Dufour und William S. Marras: *Accuracy map of an optical motion capture system with 42 or 21 cameras in a large measurement volume*. Journal of Biomechanics, 58:4, August 2017.
- [AKMN14] Anderson, Meindert, Daniel Kass, Michael Moles und Tom Nelligan (Herausgeber): *Phased-Array-Prüfung - Grundlagen für industrielle Anlagen*. Olympus NDT, Massachusetts, 2014.
- [AZPT17] Amza, Catalin Gheorghe, Aurelian Zapciu, Diana Popescu und Octav Teodorescu: *Augmented reality application for training in pipe defects ultrasonic investigation*. Band 121, Romania, Januar 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201712104001.
- [Bon17] Bonasio, Alice: *The Start-Up Using Augmented Reality to Clean Up The Real World*, Mai 2017. <http://techtrends.tech/tech-trends/cleaning-up-with-augmented-reality>, besucht: 2017-11-20.
- [DBGJ13] Dörner, Ralf, Wolfgang Broll, Paul Grimm und Bernhard Jung (Herausgeber): *Virtual und augmented reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der virtuellen und augmentierten Realität*. eXamen.press. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2013, ISBN 978-3-642-28902-6 3-642-28902-9.
- [DPD⁺10] Deutsch, Volker, Michael Platte, Wolfram A. Karl Deutsch, Volker Schuster und Manfred Vogt: *ZfP kompakt und verständlich - Die Ultraschallprüfung*, Band 1. Castell-Verlag GmbH, Wuppertal, 2010, ISBN 978-3-934255-52-4.

- [FFS⁺15] Fadzil, Muhaimin Mohd, 'Athif Mohd Faudzi, Mostafa Sayahkarajy, Mohamad Amir Shamsudin, Dyah Ekashanti Octorina Dewi und Eko Supriyanto: *Design, simulation, and kinematic analysis of a manipulator-based 3D position tracking system*. In: *2015 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)*, Seiten 55–59, Oktober 2015.
- [IIGI16] Islam, Shahidul, Bogdan Ionescu, Christian Gadea und Dan Ionescu: *Indoor positional tracking using dual-axis rotating laser sweeps*. In: *2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Seiten 1–6, Mai 2016.
- [JWW⁺17] Jayaweera, Malith, Indika Wijesooriya, Damith Wijewardana, Tharindu De Silva und Chandana Gamage: *Enhanced Real-Time Machine Inspection with Mobile Augmented Reality for Maintenance and Repair: Demo Abstract*. In: *Proceedings of the Second International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation, IoTDI '17*, Seiten 287–288, New York, NY, USA, 2017. ACM, ISBN 978-1-4503-4966-6. <http://doi.acm.org/10.1145/3054977.3057302>, besucht: 2017-12-12.
- [KCS16] Kanithi, Praveen Kumar, Jyotirmoy Chatterjee und Debdoot Sheet: *Immersive Augmented Reality System for Assisting Needle Positioning During Ultrasound Guided Intervention*. In: *Proceedings of the Tenth Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing, ICVGIP '16*, Seiten 65:1–65:8, New York, NY, USA, 2016. ACM, ISBN 978-1-4503-4753-2. <http://doi.acm.org/10.1145/3009977.3010023>, besucht: 2017-12-12.
- [LLSLH15] Langlois, Pierre, Benoît Lepage, Martin St-Laurent und Jason Habermehl: *A system and method of non-destructive inspection with a visual scanning guide*, November 2015. European Patent EP 2 846 158 A2.
- [Mat] MathWorks: *Find minimum of unconstrained multivariable function using derivative-free method - MATLAB fminsearch*. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fminsearch.html>, besucht: 2018-04-18.
-

- [MBH⁺04] Moles, Michael D.C., Colin R. Bird, Pamela Herzog, Tim Armitt, Petru Ciorau, Ron Roberts und Mark Davis: *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications*. Olympus NDT, Waltham, MA, USA, 3. Auflage, 2004.
- [MRDFH15] Meyer, Jean, Jörg Rehbein, Jens De Freese und Jens Holtmanspötter: *Visualisation of Ultrasonic testing Data using Augmented Reality*. 6, Erding, 2015. DGZIP.
- [PGHH16] Perla, Ramakrishna, Gaurav Gupta, Ramya Hebbalaguppe und Ehtesham Hassan: *InspectAR: An Augmented Reality Inspection Framework for Industry*. In: *2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct)*, Seiten 355–356, September 2016.
- [PHT⁺15] Palmer, Cameron Lowell, Bjørn Olav Haugen, Eva Tegnander, Sturla H. Eik-Nes, Hans Torp und Gabriel Kiss: *Mobile 3D augmented-reality system for ultrasound applications*. In: *2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Seiten 1–4, Oktober 2015.
- [SKB⁺01] Sauer, Frank, Ali Khamene, Benedicte Bascle, Lars Schinunang, Fabian Wenzel und Sebastian Vogt: *Augmented reality visualization of ultrasound images: system description, calibration, and features*. In: *Proceedings IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality*, Seiten 30–39, 2001.
- [SPHK08] Schwerdtfeger, Björn, Daniel Pustka, Andreas Hofhauser und Gudrun Klinker: *Using Laser Projectors for Augmented Reality*. In: *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '08*, Seiten 134–137, New York, NY, USA, 2008. ACM, ISBN 978-1-59593-951-7. <http://doi.acm.org/10.1145/1450579.1450608>, besucht: 2017-12-12.
- [SSCR14] Skała-Szymańska, Marta, Sławomir Cellmer und Jacek Rapinski: *Use of Nelder-Mead simplex method to arc fitting for railway track realignment*. Januar 2014, ISBN 978-609-457-640-9.
- [WBA⁺07] Walter, J, A Beausoleil, O Arès, T Brouillette, D Poulin-Gagnon und F Morrow: *Non-contact tracking of phased-array probe and real-time generation of C-scans for*

the inspection of Composite aerospace structures. Seite 28, Québec City, Québec, Juni 2007. Centre Technologique en Aérospatiale. http://www.ndt.net/article/ndt-canada2017/papers/3._Walter_2017152-NDTinCanada_JulienWalter.pdf, besucht: 2018-05-09.

- [ZLT⁺11] Zhou, Jianlong, Ivan Lee, Bruce Thomas, Roland Menassa, Anthony Farrant und Andrew Sansome: *Applying Spatial Augmented Reality to Facilitate In-situ Support for Automotive Spot Welding Inspection*. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry, VRCAI '11*, Seiten 195–200, New York, NY, USA, 2011. ACM, ISBN 978-1-4503-1060-4. <http://doi.acm.org/10.1145/2087756.2087784>, besucht: 2017-12-12.

A Anhang zur Implementierung

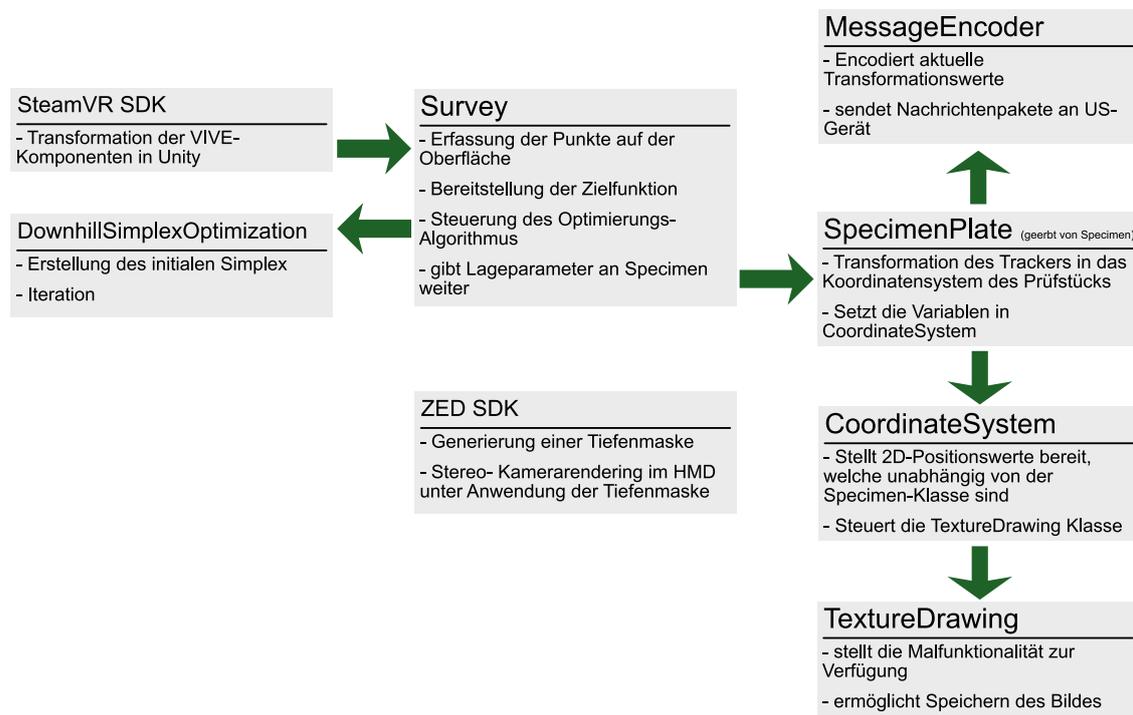


Abbildung A.1: Schematischer Aufbau der wichtigsten Klassen der AR-Anwendung

B Weitere Grafiken zur Genauigkeitsauswertung des VIVE-Trackingsystems

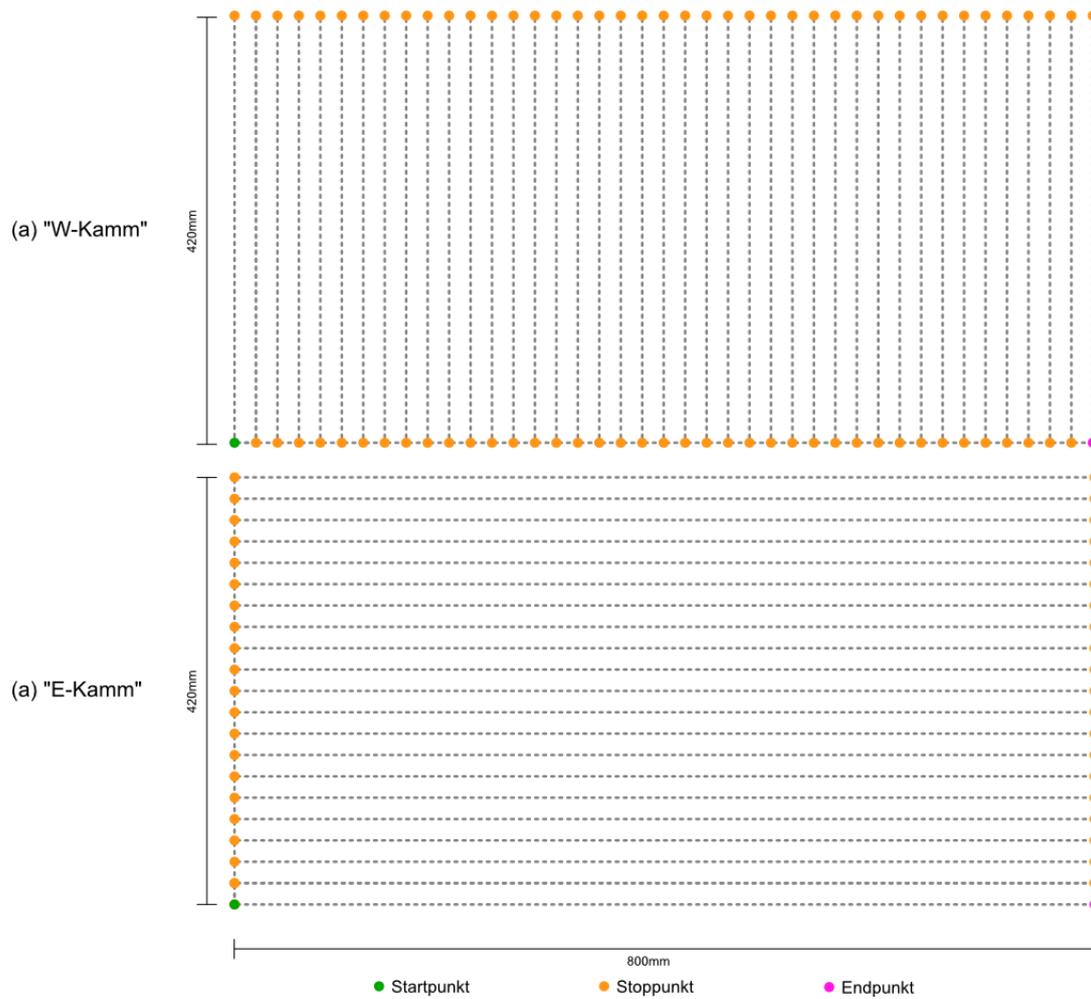


Abbildung B.1: E- und W- Kammmuster mit Start-, Stoppunkten und Maßen. Die auf der Grafik obere rechte Ecke lag am nächsten an Basisstation-B. Die in den hier dargestellten Kämmen „oberen“ Punkte sind im Versuchsaufbau „hinten“ (Abbildung 6.1)

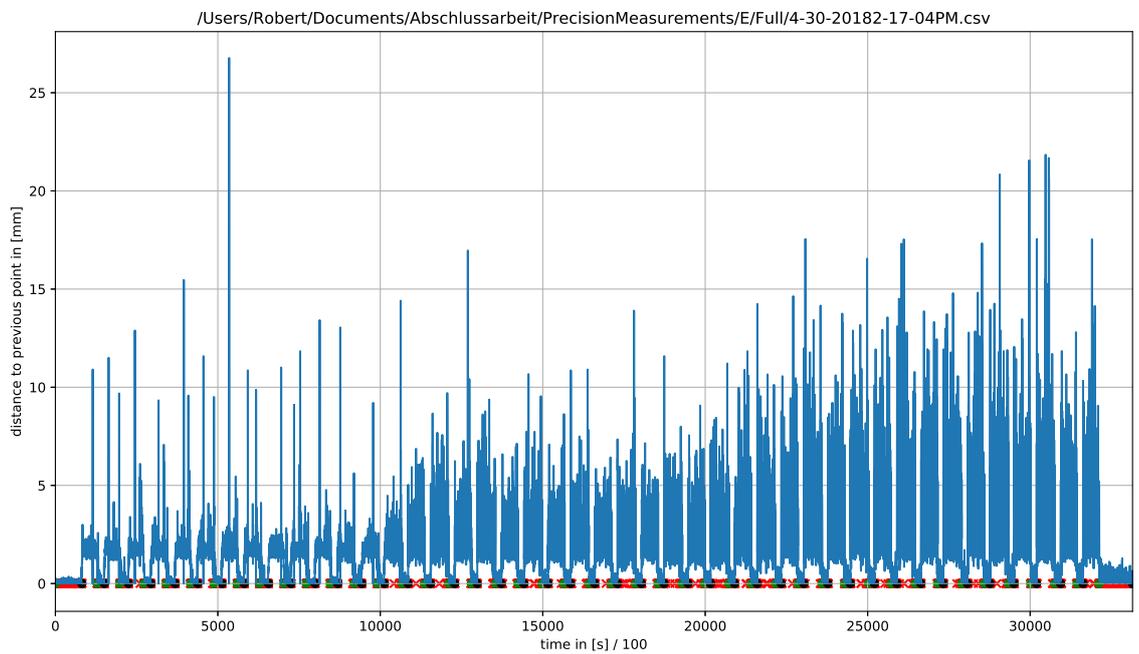


Abbildung B.2: Kompletter Scandurchgang eines E-Kamms.

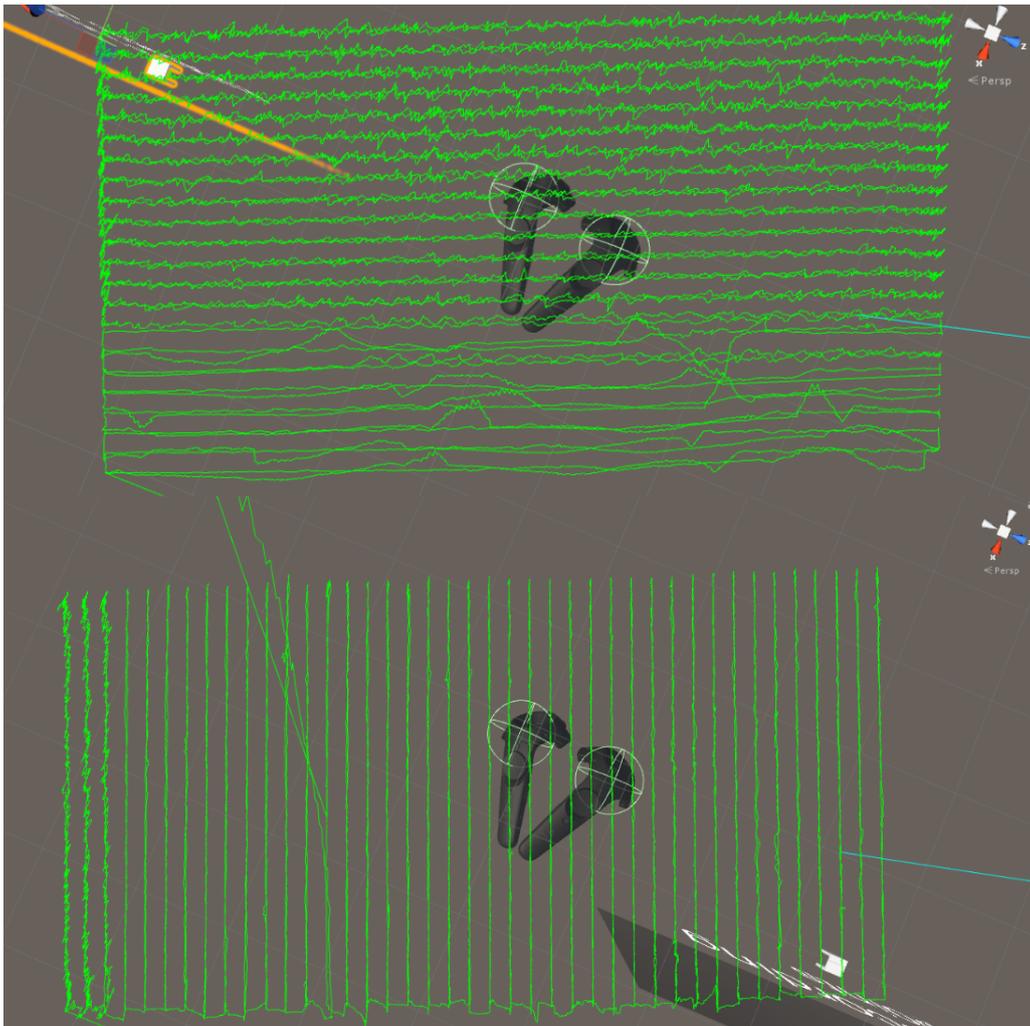


Abbildung B.3: Beispielhafte Debug-Visualisierung der zurückgelegten Wege des Trackers bei der Aufnahme eines E-Kamms (oben) und eines W-Kamms (unten)

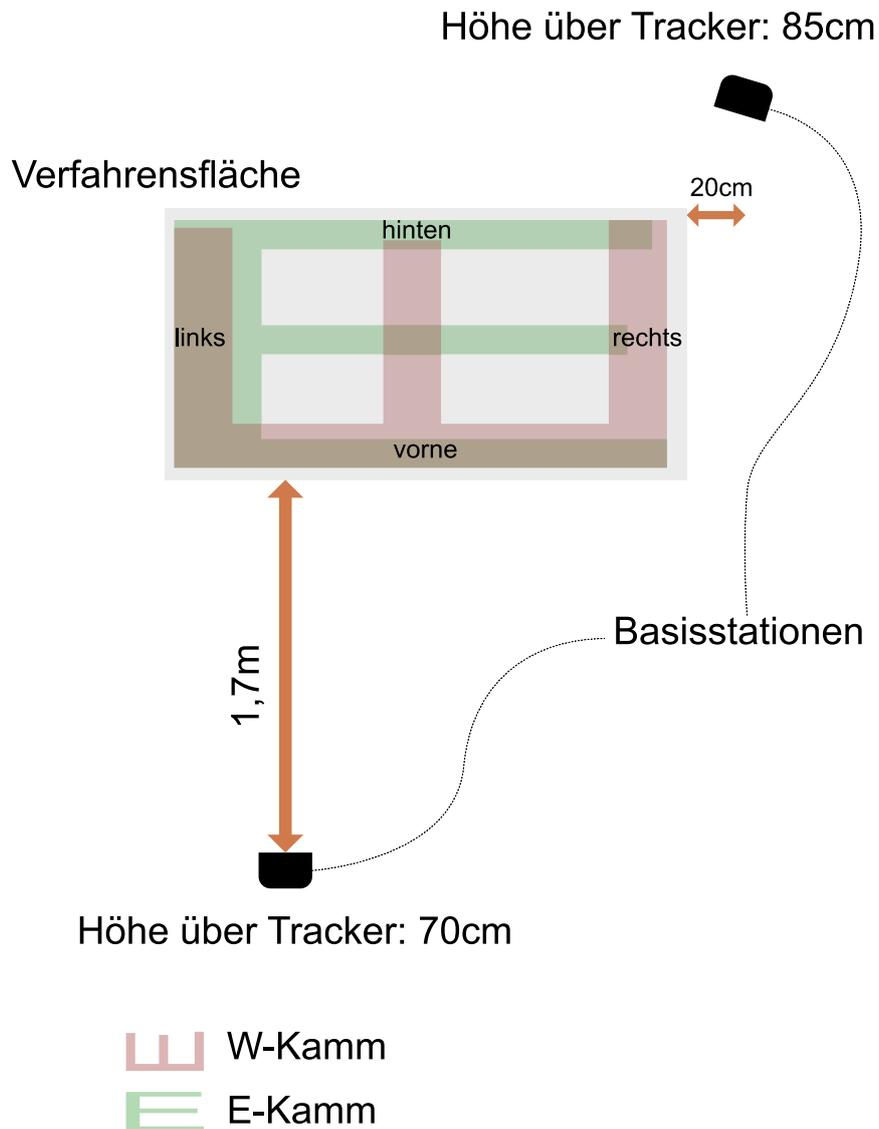


Abbildung B.4: Aufbau des Genauigkeitsversuchs

C Inhalt der beiliegenden Daten–DVD

- **AR-Anwendung** Git Verzeichnis dem Quellcode der Unity Anwendung.
- **BibTeX Eintrag.txt**
- **Delay Tracker-CG** Video der Verzögerungsmessung von Tracer zum CG Inhalt.
- **Thesis** PDF Dokument dieser Bachelorthesis.
- **Versuch-Genauigkeitsmessung**
 - **Positions-Rohdaten** Rohdaten der Messungen im .csv–Format, sowie eine einzelne Visualisierung jeder Messung (wie Abbildung B.2)
 - **Python-Auswertung** *Python*–Scripte mit denen die Daten ausgewertet wurden.
 - **precisionmeasurementConfig.txt** SteamVR Konfiguration des Versuchs.
- **Videos der Anwendung** Videos vom Stand der Anwendung Anfang April sowie zur Abgabe der Arbeit.
- **ZEDTiefenbilder** Exemplarische Tiefenbilder des ZEDmini zur Demonstration der Genauigkeit.