
Entwicklung einer Schulung zur Anwendung von Clamp-On Ultraschall Energiemessgeräten in Virtual Reality

Moritz Blecker

moritz.blecker@ehlersgmbh.de

Matrikelnummer: 4508662



Masterarbeit

Fachbereich 03
Universität Bremen

1. Gutachter: Prof. Dr. Udo Frese
2. Gutachterin: Dr. Hui Shi

Abgabedatum: 12.12.2024

Abstract

In dieser Masterarbeit wird eine Schulung für ein Clamp-On Ultraschallenergie-Messgerät entwickelt.

Als Abgrenzung zu den bereits bekannten Schulungen zu diesem Thema wird hier Virtual Reality verwendet. Dadurch soll ein Nutzer ohne Erfahrung mit dieser Messtechnik die korrekte Bedienung und Installation eines TFX-5000 Energy lernen.

Um dieses Ziel zu erfüllen, wird zunächst erörtert, wie Clamp-On Ultraschall-Energie-Messtechnik funktioniert. Weiterhin wird durch Interviews mit Experten der Branche erhoben, welche speziellen Anforderungen an eine Schulung zur Messtechnik gestellt werden. Ebenso wird in den Interviews identifiziert, welche Fehler bei einer Installation durch unerfahrene Nutzer besonders häufig auftreten und welche Fehler den größten Einfluss auf das Messergebnis haben.

Im Anschluss wird aus diesen Anforderungen ein passendes Schulungskonzept entworfen.

Aus diesem Konzept wird eine Virtual Reality Anwendung mit Hilfe von Unreal Engine entwickelt. Dazu muss zum einen eine benutzbare Software entwickelt werden, aber auch für die Schulung passende 3D-Modelle entworfen werden.

Um zu prüfen, ob die Schulung benutzerfreundlich gestaltet wurde und einen unerfahrenen Nutzer dazu befähigen kann, ein solches Messgerät in Betrieb zu nehmen, wird eine Nutzerstudie durchgeführt.

An dieser Evaluation haben 24 Personen mit unterschiedlichen Vorkenntnissen und demografischen Hintergründen teilgenommen.

Im Rahmen der Auswertung konnte festgestellt werden, dass die meisten Teilnehmer die Schulung als sehr gut benutzbar empfunden haben. Außerdem konnte gezeigt werden, dass sich diese Personen, abhängig von den Vorkenntnissen, gut auf eine Installation des Messgeräts vorbereitet gefühlt haben.

Bei der Beobachtung der Teilnehmer konnte erkannt werden, dass einige Teilnehmer zu Beginn Probleme mit dem Medium VR hatten. Die Inbetriebnahme konnte abhängig von den Vorkenntnissen bei allen Teilnehmern erfolgreich durchgeführt werden. Abschließend wurden durch die Evaluation drei unregelmäßig auftretende Fehler in der Anwendung gefunden, welche vor einer Veröffentlichung der Software behoben werden sollten.

Erklärung

Ich versichere, die Masterarbeit ohne fremde Hilfe angefertigt zu haben. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Bremen, den 12.12.2024

.....
(Moritz Blecker)

Gender-Hinweis

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei Personenbezeichnungen und personenbezogenen Hauptwörtern in dieser Masterarbeit die männliche Form verwendet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter und beinhalten keine Wertung.¹

¹Gender-Hinweis in leicht angepasster Form übernommen von:
<https://www.randstad.de/ueber-randstad/gender-hinweis/>

Inhalts-Hinweis

Diese Arbeit ist mit Unterstützung der H. Hermann Ehlers GmbH entstanden. Für die Erstellung der Arbeit stellte Firma Ehlers ein Messgerät sowie Material für ein Prüfboard zur Verfügung.

Auf den tatsächlichen Inhalt der Arbeit hatte Firma Ehlers keinen direkten Einfluss.

Des Weiteren wurden für Fachwissen Informationen der Firma Ehlers, der Firma Badger Meter Europa GmbH sowie Wissen von Mitarbeitern weiterer Firmen verwendet.

Auch hier gilt, die Grundlagen für das fachspezifische Wissen wurden aus Dokumenten, sowie Interviews und E-Mails gewonnen, auf den konkreten Inhalt, sowie insbesondere auf die Durchführung und Auswertung der Evaluation gab es keine Einflussnahme.

Danksagung

Ohne die Unterstützung von verschiedenen Personen wäre diese Masterarbeit nicht in der gleichen Qualität zustande gekommen.

Dabei möchte ich zuerst der Firma H. Hermann Ehlers GmbH danken, diese stellten die für die praktische Durchführung erforderlichen Messgeräte sowie Materialien für ein Prüfboard zur Verfügung. Überdies danke ich Kevin Grams, da dieser bei dem Zusammenbau des Prüfboards durch sein Fachwissen und seiner Tatkraft erst die Verwendung der gewählten Materialien ermöglicht hat.

Anschließend möchte ich allen Personen danken, die für Interviews und weiterführende Fragen bereitstanden. Einen weiteren großen Dank möchte ich meinem Vater entgegenbringen, dieser hat durch Korrekturlesen der kompletten Arbeit dafür gesorgt, dass deutlich weniger Fehler im Text vorhanden sind. Ebenso gilt ein großer Dank Prof. Dr.-Ing. Udo Frese, durch deine Hilfe konnte der Rahmen der Arbeit bestimmt sowie Unsicherheiten für den wissenschaftlichen Anteil dieser Arbeit beseitigt werden. Abschließend möchte ich mich noch bei allen Teilnehmern der Evaluation bedanken, ohne euch wäre eine Auswertung der Software nicht möglich gewesen.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Ziel der Arbeit	2
3	Grundlagen	3
3.1	Clamp-On Ultraschall Energiemessung	3
3.1.1	Physikalische Konzeption	4
3.1.2	Montage der Sensoren	6
3.2	Virtual Reality	7
3.2.1	Was ist Virtual Reality?	8
3.2.2	Verbreitung von VR-Training	8
3.2.3	Vor- und Nachteile einer VR-Schulung	9
3.2.4	Fazit	11
3.3	Unreal Engine	11
4	Recherchen zu Clamp-On Ultraschall Energiemessungen	14
5	Schulungskonzept	15
5.1	Anforderungen und Inhalte	15
5.1.1	Anforderungen an den Installationsort	15
5.1.2	Anforderungen an die Inbetriebnahme	16
5.2	Didaktisches Konzept	18
5.3	Interaktionskonzept	19
6	Beschreibung der einzelnen Module	22
6.1	Video-Modul: Grundlagen der Ultraschall-Energiemesstechnik	22
6.2	VR Startumgebung	22
6.3	1. Modul: Einschätzung von möglichen Installationsorten	23
6.4	2. Modul: Vertiefung der Distanzen	25
6.5	3. Modul: Inbetriebnahme eines Clamp-On Energie-Messgeräts	25
6.5.1	Parametererhebung	26
6.5.2	Anklemmen der Kabelenden am Messumformer	27
6.5.3	Parametrierung mit Solocue	28
6.5.4	Vorbereitung und Montage des Ultraschallsensors	29
6.5.5	Temperaturfühler Montage	31
6.5.6	Signalüberprüfung und Nullpunktgleich	31

6.6	4. Modul: Finden von Fehlern in einer Installation	33
6.6.1	Station 1 - Kein Signal	33
6.6.2	Station 2 - Falsche Temperaturmessung	34
6.6.3	Station 3 - Negative(r) Durchfluss/ Temperatur	35
6.6.4	Station 4 - Falscher Durchflusswert	36
6.6.5	Station 5 - Wissen zur Signalauswertung	36
7	Erstellung der Schulung	38
7.1	Erstellung der Videos	38
7.2	Automatische Berechnung und Anzeige von Verwirbelungen	38
7.2.1	Der Auto turbulence detection (ATD) Algorithmus	39
7.2.2	Sonderfälle in der ATD-Berechnung - Rohrbögen	41
7.2.3	Anzeige der berechneten Verwirbelungen	43
7.2.4	Start des ATD	43
7.3	Entwicklung der 3D Modelle	43
7.4	Komplexere Objekte	44
7.4.1	Levelmanager	44
7.4.2	SoloCue	45
7.4.3	Messwertumformer	47
7.4.4	Messwertaufnehmer	47
7.4.5	Temperaturfühler	49
7.4.6	Videobildschirme	50
7.5	Einfache Objekte	50
7.5.1	Druckknöpfe	51
7.5.2	Laserpointer	52
7.5.3	Wandstärkenmessgerät	52
7.5.4	Messschieber	53
7.5.5	Schraubendreher	53
7.5.6	Wärmeleit- und Koppelpaste	54
7.5.7	Schleifpapierblock	54
7.5.8	USB-Kabel	55
7.5.9	Ferritkern	55
8	Praktischer Teil - Rohrsystem	57
8.1	Planung des Rohrsystems	57
8.1.1	Rohrnennweite und Material	57
8.1.2	Bau eines Gestells	58
8.1.3	Pumpe und Befüllung	59
8.1.4	Planung des Rohrverlaufs	60
8.2	Aufbau des Rohrsystems	60

9	Evaluation	62
9.1	Evaluations-Konzept	62
9.1.1	Konzept einer A/B Studie	62
9.1.2	Konzept einer Nutzbarkeitsstudie	62
9.2	Zielgruppe	63
9.3	Erwartungen	63
9.4	Fragebogen	63
9.5	Pilotstudie	65
9.6	Durchführungsbericht	65
9.6.1	Anpassung des VR-Erlebnisses	65
9.6.2	Erfolg des didaktischen Konzepts	66
9.6.3	Probleme in der VR-Schulung	67
9.6.4	Beobachtung des praktischen Teils, Montage am Prüfboard	68
9.7	Auswertung der Fragebögen	69
9.7.1	Demografie	69
9.7.2	Vorerfahrungen	71
9.7.3	Antworten zu der Benutzbarkeit des Systems	72
9.7.4	Fragen zur Inbetriebnahme	76
9.8	Fazit der Evaluation	77
10	Ausblick	79
10.1	Begrenzungen	79
10.2	Ausbau und Weiterentwicklung der Schulung	80
10.2.1	Weitere Module	80
10.2.2	Weitere Funktionen	80
11	Abschluss Fazit	82
A	Glossar	83
B	Akronyme	85
	Literatur	89
	Abbildungsverzeichnis	89
C	Anhang	93
C.1	Hinweis zur Evaluationsauswertung	93
C.2	Hinweis zur Inhaltsprüfung	93
C.3	USB-Stick	93

Kapitel 1 EINLEITUNG

Aufgrund des Klimawandels und der Ressourcenknappheit wird zurzeit intensiver auf den Energieverbrauch von Gebäude- und Industrieanlagen geachtet. Um den Energieverbrauch dieser Anlagen zu optimieren, muss zuerst der tatsächliche Verbrauch erfasst und analysiert werden.

Die Nachrüstung von Energiemessgeräten innerhalb der Rohrleitungen erfordert einen erheblichen Aufwand und Anlagenstillstand. Aus diesem Grund werden vermehrt eingriffsfreie Alternativen gesucht. Eine bereits erprobte Variante ist das *Clamp-On Ultraschall Energiemessgerät*. Zwei Ultraschallsensoren werden auf die Rücklaufleitung² und je ein Temperaturfühler auf die Vor-³ und Rücklaufleitung der Anlage installiert. Da diese Sensoren von außen angelegt werden, ist dies ohne Anlagenstillstand möglich.

Bei der Installation und Inbetriebnahme sind jedoch einige Herausforderungen zu berücksichtigen. Diese Geräte werden häufig von Elektrotechnikern installiert, die vorher noch keine Erfahrungen mit dieser Technik oder hydraulischen Gegebenheiten hatten. Um die Qualität der Messergebnisse zu sichern, kann es hilfreich sein, die Installateure vorher zu schulen.

Bisher werden Schulungen häufig in Schulungszentren der Hersteller oder in den Anlagen der Kunden abgehalten. Dies ist allerdings mit einem gewissen Aufwand verbunden, da entweder der Ausbilder oder die Teilnehmer eine längere Anreise haben.

Aufgrund dieses Aufwands wird häufig auf eine Schulung verzichtet und nur die Herstelleranleitung des Gerätes verwendet.

Eine Lösung für dieses Problem könnte eine eigenständige Schulung mithilfe von *Virtual Reality (VR)* sein.

Dies wird durch die immer niedrigeren Anschaffungskosten der benötigten Hardware unterstützt. Eine komplette Ausstattung für einfache Anwendungen kann mit der Meta Quest 3S beispielsweise schon für ca. 330 € inkl. MwSt. angeschafft werden [Metb].

Demgegenüber steht jedoch die beschränkte Verbreitung von VR.

So haben etwa laut ZDH und Bitkom Research erst drei Prozent der befragten Handwerksunternehmen VR in ihre Prozesse integriert.

Weiterhin planen allerdings elf Prozent der Unternehmen, dies in der Zukunft zu ändern.[ZDH22].

Clamp-On Ultraschall Energiemessgerät: Ein Messgerät, mit dem der Wärme-/Kälteenergiefluss innerhalb einer Rohrleitung gemessen werden kann. Dazu werden von außen zwei Sensoren auf die Rohrleitung geklemmt, ohne diese zu öffnen.

VR: Eine virtuelle 3D-Umgebung, in welche der Nutzer durch eine VR-Brille eintauchen und sich meist durch Bewegungen in der realen Welt mit dieser interagieren kann. Es wird unter anderem die Bewegung der Hände in die virtuelle Welt übertragen.

²Kalte Leitung zurück zur Heizung

³Warme Leitung zum Heizkörper

Kapitel 2 **ZIEL DER ARBEIT**

In dieser Arbeit wird eine Schulung für das Energiemessgerät TFX 5000 Energy auf VR-Basis entwickelt.

Zunächst werden die wesentlichen Grundlagen erläutert, die für ein besseres Verständnis wichtig sind.

Danach werden die Anforderungen an eine solche Schulung durch Interviews von verschiedenen Experten aus der Branche und Bedienungsanleitungen des Messgerätes erhoben.

Anschließend wird ein didaktisches Konzept erstellt, das die Teilnehmer auf die Installation eines solchen Messgerätes vorbereitet. Aufbauend wird eine VR-Umgebung und Schulungsvideos entworfen.

Zum Abschluss wird ein Nutzertest durchgeführt, um zu evaluieren, wie erfolgreich die Studie umgesetzt wurde und ein Fazit zu ziehen.

Kapitel 3 GRUNDLAGEN

Zur Erlangung eines grundlegenden Verständnisses der in der Arbeit verwendeten Technologien werden zunächst die verschiedenen Grundlagen erläutert.

3.1 Clamp-On Ultraschall Energiemessung

Um die Energiemenge ohne Eingriff in die Rohrleitung zu erfassen, kann ein Ultraschallsender/-empfänger in Kombination mit Temperaturfühlern verwendet werden.

Ein solches Messgerät besteht aus zwei Komponenten, zum einen werden die Rohdaten mit Hilfe von Sensoren erfasst, siehe Bild 2. Zum anderen werden diese Rohsignale in einem Messwertumformer in die gewünschten Messeinheiten umgerechnet. (Siehe Bild 1) Zusätzlich werden diese auf dem Bildschirm angezeigt und können über Schnittstellen an andere Systeme übertragen werden.



Abbildung 1: Der TFX-5000 Energy Messwertumformer.

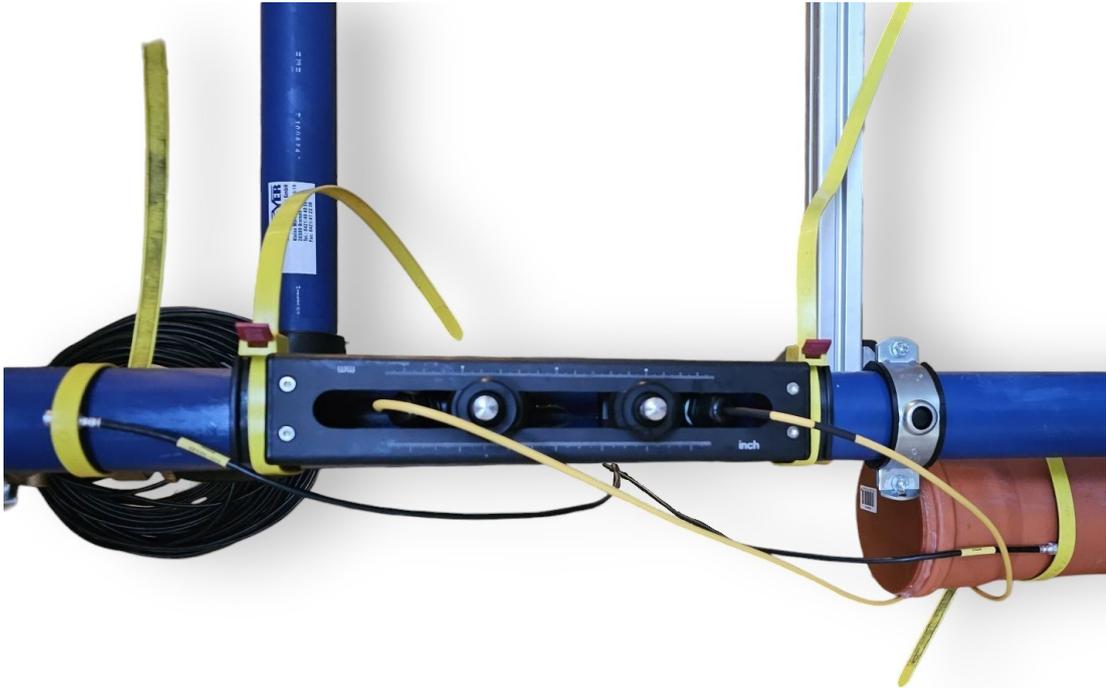


Abbildung 2: Der Ultraschallsensor und die Temperaturfühler an zwei Rohrleitungen montiert.(Demonstrationsmontage)

Im Weiteren wird erklärt, wie dies im Detail funktioniert. Zunächst wird das grobe Konzept erläutert, bevor auf einige Details eingegangen wird.

3.1.1 Physikalische Konzeption

Vereinfacht dargestellt wird zur Erfassung der Energiemenge zunächst der Volumenstrom des Wärmeträgers erfasst. Dazu wird ein grundlegendes Konzept der Akustik verwendet.

Der Volumenstrom wird wie folgt beschrieben: $Q = v * A$ wobei v die Geschwindigkeit und A den durchströmten Querschnitt darstellt.

Zur Messung der Fließgeschwindigkeit wird ein *Ultraschallsignal* in die Rohrleitung induziert, dies wird gegen und mit der Fließrichtung in einem sehr kurzen Abstand durchgeführt.

Die Schallgeschwindigkeit des Mediums ist eine Konstante, welche unter anderem von Dichte, Druck und Temperatur abhängt.

Unabhängig davon ist die Laufzeit des Signals gegen die Strömung länger als mit dieser.

Dieser Laufzeitunterschied kann mithilfe eines Bootes verdeutlicht werden. Der Schall wird wie das Boot mit der Strömung beschleunigt und gegen diese

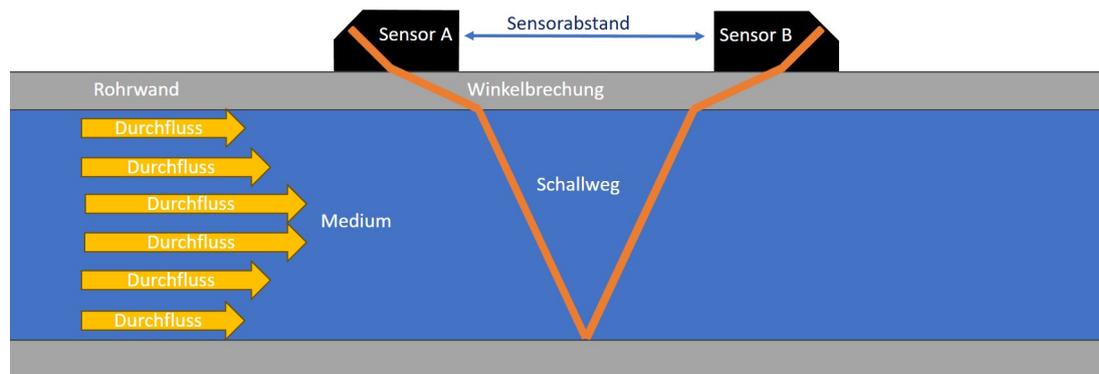
Ultraschallsignal:
Eine Schallwelle, welche für Menschen nicht hörbar ist, da sie oberhalb von 20 kHz liegt. Fledermäuse beispielsweise können dieses Signal hören.

3 Grundlagen

gebremst.

Dadurch entsteht eine Differenz in der Laufzeit, die proportional zur Fließgeschwindigkeit ist.

Eine ideale Messung kann bei einem rotationssymmetrischen turbulenten Fließprofil mit einer *Reynolds-Zahl* größer 2.300 erreicht werden.



Reynolds-Zahl: Durch die Reynolds-Zahl kann unter anderem errechnet werden, ob ein turbulentes oder laminares Fließprofil im Medium unter gegebenen Umständen entsteht. Eine Zahl unterhalb von 2000 beschreibt ein laminares Fließbild, darüber beginnt das Fließprofil turbulent zu werden. [Stu]

Abbildung 3: Eine Skizze der Schallausbreitung des Signals im Rohr. Die Pfeile repräsentieren die Fließgeschwindigkeit, je länger der Pfeil, desto höher die Geschwindigkeit. Dies ist ein rotationssymmetrisches, turbulentes Strömungsprofil, mit einer Reynolds-Zahl > 2.300 , ideal zur Messung.

Die Fließgeschwindigkeit wird wie folgt beschrieben: $v = \frac{L}{2 \cdot \cos(\alpha)} \cdot \frac{t_2 - t_1}{t_1 \cdot t_2}$
 L ist der Abstand zwischen den Sensoren, α ist der Winkel des Schalls, t_1, t_2 sind die Laufzeiten mit und gegen die Strömungsrichtung.

Die Signallaufzeiten sind durch die physikalischen Gegebenheiten vorgegeben. Das Material der Rohrleitung, Wandstärke sowie Messmedium, dessen Temperatur und Abstand der Sensoren beeinflussen die Signallaufzeiten. Der Austrittswinkel aus dem Sensor wird bei der Produktion mechanisch festgelegt.

Der Nutzer hat direkten Einfluss auf den montierten Sensorabstand. Wird dieser Abstand anders montiert, als durch das Gerät vorgegeben, wird die Fließgeschwindigkeit fehlerhaft berechnet.

Die Kreisflächenformel berechnet den durchflossenen Querschnitt: $A = r^2 \cdot \pi$
Da bei der Parametrierung nur die Wandstärke W und Außendurchmesser D_A angegeben werden, kann mithilfe dieser Werte der Radius berechnet werden:
 $r = \frac{D_A - 2 \cdot W}{2}$.

Zusätzlich werden die Temperaturen in der Vorlauf- und Rücklaufleitung ge-

3 Grundlagen

EN1434: Eine Europanorm zur Berechnung der Wärmemenge im Abrechnungsverkehr, unter anderem ist hier spezifiziert, wie die Wärmemenge berechnet wird. Clamp-On Messungen können aufgrund der veränderbaren Bauform nicht für den Abrechnungsverkehr verwendet werden, daher ist die Berechnung hier in Anlehnung an die Norm.

messen, daraus ergibt sich eine Temperaturdifferenz ΔT .

In Kombination mit der Durchflussmenge kann in Anlehnung an die [EN1434](#) die Wärmemenge errechnet werden: $Q_{Energie} = Q_{Durchfluss} * \rho * C_p * \Delta T$.

$Q_{Durchfluss}$ ist die berechnete Durchflussrate, ρ ist die Dichte des Mediums, C_p ist die konstante druckabhängige Wärmekapazität des Mediums, ΔT ist die Temperaturdifferenz.

ρ und C_p werden durch das Messgerät vorgegeben, diese sind für die auswählbaren Medien im Gerät gespeichert, der Nutzer könnte hier allerdings das falsche Medium auswählen.

Die Genauigkeit von ΔT hängt von der Einstellung und korrekten Montage der Temperaturfühler ab.

3.1.2 Montage der Sensoren

Um eine Schallübertragung in verschiedenen Situationen sicherzustellen, gibt es mehrere Möglichkeiten der Sensormontage.

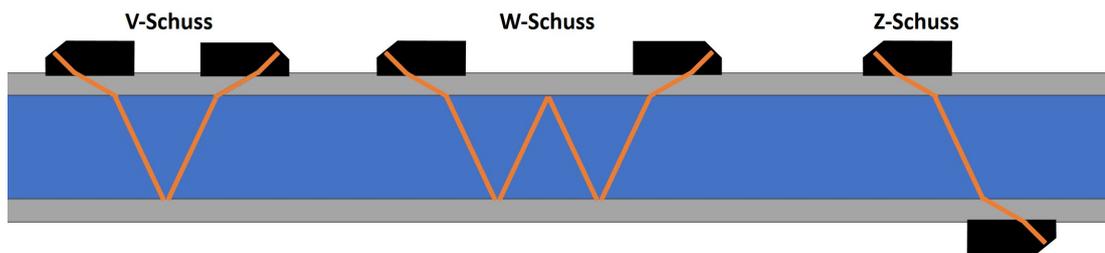


Abbildung 4: Verschiedene Montagearten für die Ultraschallsensoren.

Die übliche Montagemethode besteht darin, die Sensoren nebeneinander zu positionieren und den Schall durch eine Reflexion an der gegenüberliegenden Rohrseite in den anderen Sensor zu reflektieren.

Dies wird auch als V-Schuss bezeichnet, da der Schallweg annähernd einem „V“ gleicht. Die beiden (2) Schallpfade ermöglichen eine gute Balance zwischen Signalstärke und Signalnutzen. Wird in dieser Anordnung kein ausreichend starkes Signal empfangen, sollte der Z-Schuss verwendet werden.

Für den Z-Schuss werden die Sensoren mit etwas Versatz gegenüberliegend am Rohr montiert.

Durch die Verwendung eines (1) Schallpfads wird das Signal stärker als im V-Schuss. Diese Montageart ist besonders für große Rohrleitungen oder akustisch stark dämpfende Materialien geeignet. Zusätzlich wird diese auch bei

Störungen durch Gasblasen oder Feststoffen als Lösungsansatz verwendet, da diese bei einem Schallweg eine geringere Beeinträchtigung erzeugen.

Durch den einfachen Schallweg wird die Differenzlaufzeit kürzer, was bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten Ungenauigkeiten erzeugen kann.

Die Verwendung von Sensoren im unteren Bereich der für den Sensor geeigneten Nennweiten kann zu starken Störgeräuschen führen, welche die Signalauswertung beeinflussen können.

Bei einem sehr starken Signal im V-Schuss kann der W-Schuss gewählt werden. Dadurch wird die Anzahl der Schallpfade verdoppelt, wodurch das Signal abgeschwächt wird. Dies führt zu einer höheren Differenzlaufzeit, was insbesondere bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten eine höhere Genauigkeit ermöglicht.

Diese Positionierung ist besonders für kleine Nennweiten geeignet. Diese ermöglichen häufig ein starkes Signal, gleichzeitig haben sie durch den geringen Durchmesser kurze Schallpfade und damit kleine Differenzlaufzeiten.

Außerdem werden durch den größeren Abstand vom Sender erzeugte Störgeräusche weniger stark empfangen.

Bei akustisch dämpfenden Materialien oder Rohrleitungen, die im schlechten Wartungszustand sind, kann es zu einem Signalausfall kommen. Die Ausrichtung der Sensoren ist etwas schwieriger, da durch die Reflexionen der tatsächlich benötigte Abstand schwerer zu treffen ist.

Die physikalische Ausbreitung des Schalls im Rohr ist bei allen dieser Varianten gleich, ebenso wird bei einem Z-Schuss der Schall auch in der W-Schussposition theoretisch empfangbar sein.

Das Messgerät errechnet, wie lange das Schallsignal von dem Sender bis zu dem Empfänger benötigt. Signale, die außerhalb dieses Zeitintervalls empfangen werden, ignoriert das Messgerät. Dieses Zeitfenster wird in Abhängigkeit der Montageart und Parameter angepasst.

Daher ist es wichtig, die Sensoren passend zur Auswahl der Montageart auf dem Rohr zu positionieren, um Fehlmessung/ Messausfall zu verhindern.

3.2 Virtual Reality

Der Abschnitt gliedert sich in vier Bereiche: Zunächst wird erläutert, was VR ist, anschließend wird auf die Verbreitung von VR-Trainings im Industriebereich eingegangen. Darauf folgend werden die Vor- und Nachteile einer VR-Schulung erläutert. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse auf das Anwendungsgebiet VR-Schulung zu Clamp-On Ultraschall Energiemessgeräten eingeordnet.

3.2.1 Was ist Virtual Reality?

Die Definitionen von VR können vielfältig sein. Im Rahmen dieser Arbeit ist die Simulation einer vereinfachten realen Umgebung gemeint, in die der Teilnehmer mittels einer *VR-Brille* eintauchen kann, sodass er das Gefühl hat, in dieser 3D-Welt zu sein. Zur Interaktion mit dieser Welt kann der Teilnehmer sich durch Bewegung im realen Raum gleichzeitig in der virtuellen Welt fortbewegen, dazu zählt Gehen sowie Drehen und Umschauen. Um größere Distanzen zurückzulegen, kann der Teilnehmer sich mit den Controllern teleportieren. Greifen und Benutzen von Gegenständen in der Simulation kann durch die Bewegung der Hand zu diesem Gegenstand hin und einen Tastendruck am Controller durchgeführt werden. Ähnlich wie in der realen Welt fällt der Gegenstand auf den Boden, sobald die Taste los gelassen wird. Durch die Taste wird das Öffnen und Schließen der Hand simuliert.

VR-Brille: Eine Brille mit einem Bildschirm pro Auge, mithilfe derer 3D-Umgebungen für den Tragenden simuliert werden können.

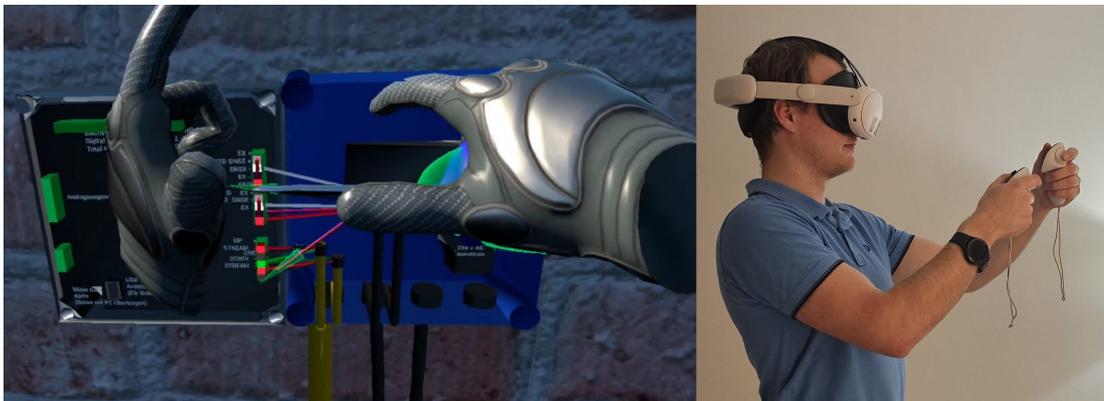


Abbildung 5: Eine VR-Interaktion aus der virtuellen Egoperspektive (links) und aus der Third-Person Perspektive in der physischen Welt (rechts).

3.2.2 Verbreitung von VR-Training

Zur Verbreitung von VR-Training im Allgemeinen sind wenig Studien auffindbar, durch eine Recherche bei Google lassen sich unter den Stichworten „VR-Training, VR-Safetytraining, Instruments VR Training, technical VR-Training ...“lassen sich jedoch zahlreiche Anbieter und Zeitschriftartikel finden. Hier wird VR-Training häufig als schneller und effektiver beschrieben. [Gmba] Wissenschaftliche Arbeiten gibt es vorwiegend in Bezug auf die Effektivität dieser Schulungen, hier kann ein Anstieg an Studien zu diesem Thema beobachtet werden.[SD23] In der Arbeit von Paweł Strojny and Natalia Dużmańska-Misiarczyk wurden nicht nur Studien zu VR-Schulungen untersucht, sondern auch zu etwa klassischen Desktop-Anwendungsschulungen. Diese finden seit 2008 größere Verbreitung. Im Jahr 2019 übersteigt die Anzahl

der ausgewählten Studien zum Thema VR erstmals die Desktopanwendungen.

In einer weiteren Arbeit von D. Scorgie et al. wurden Studien zum Thema VR safety training betrachtet. Diese Arbeit befasst sich ausschließlich mit VR-Studien und beginnt mit Studien von 2013 und endet ebenfalls im Jahr 2021.

Auch hier kann ein starker Anstieg von eine (1) Studie im Jahr 2013 bis zu 16 Studien im Jahr 2021 beobachtet werden. [Sco+24] Sicherheitstrainings scheinen anhand der eigenen Recherchen das größte Anwendungsfeld für VR-Schulungen zu sein. Es wird vermutet, dass dies daran liegt, dass diese in vielen Branchen vorgeschrieben sind und auch regelmäßiger Wiederholung bedarf, so ist bei einigen Tätigkeiten eine jährliche Sicherheitsunterweisung vorgeschrieben.

Durch diese zahlreichen und häufigen Anwendungen steigt hier die Attraktivität für Firmen, solche Software zu entwickeln. Zusätzlich kann ein Nutzer auch in einer ursprünglich gefährlichen Situation risikoarm geschult werden. Im Bereich des speziellen Anwendungstrainings, wie es das Ziel dieser Arbeit ist, ist recht wenig zu finden.

Es wird angenommen, dass dies daran liegt, dass diese meist Nischenanwendungen sind, da diese meist auf spezielle Gerätschaften von einzelnen Herstellern zugeschnitten sind.

Hier konnte insbesondere eine Arbeit zu einer Kooperation von Fahmi Bellalouna gefunden werden, diese beschäftigt sich mit der Entwicklung einer VR-Schulung zur Bedienung von Spezialfahrzeugen. [Bel20] Speziell für Durchfluss- oder Energiemessgeräte konnte keine Schulung oder Paper gefunden werden.

3.2.3 Vor- und Nachteile einer VR-Schulung

Die Virtualisierung von Training mithilfe von VR hat einige Vorteile. Einer der größten sind vermutlich die Kosteneinsparungen.

Virtuelle Trainings können beispielsweise ohne die Benutzung der realen Gegenstände durchgeführt werden, so könnten unter anderem Feuerwehrleute in einem Brandszenario ausgebildet werden, ohne dass ein Objekt zerstört werden muss. [Gmbb]

Ein weiterer Punkt der Kosteneinsparung ist das Personal. Um eine oder mehrere Personen auszubilden, muss ein entsprechend gut fortgebildeter Mitarbeiter, oder externer Dienstleister beschäftigt werden.

Diese Kosten werden größer, je mehr Mitarbeiter geschult werden müssen. Ferner steigen diese Kosten, wenn die räumliche Distanz zwischen Ausbilder und Mitarbeiter steigt, sodass längere Anreisen erforderlich sind.

Laut dem Institut der Deutschen Wirtschaft Köln (IDWK) hat ein Mitarbeiter 2022 im Schnitt an 20,3 Stunden Schulung teilgenommen, die Kosten hierfür belaufen sich auf rund 1.347 €/ pro Jahr und Mitarbeiter. [alc]

Wie in der Einleitung erwähnt starten die VR-Brillen ab 330 €, hierzu kommen zusätzlich die Personalkosten des zu schulenden Mitarbeiters und die Kosten für die Bereitstellung eines entsprechend großen Raumes sowie die Kosten der Software selbst. Diese Kosten passen durchaus gut in das von der IDWK angegebene Budget.

Unabhängig von der Kostenseite gibt es noch weitere Vorteile. So kann eine VR Schulung von einem Mitarbeiter zeitlich, teils auch räumlich recht unabhängig durchgeführt werden, sodass der Zeitraum und Ort besser an die Bedürfnisse der Mitarbeiter angepasst werden kann.

Weiterhin kann ein Mitarbeiter eine Schulung oder Teile davon mehrfach wiederholen, wenn die Schulung als Einzelperson durchgeführt werden kann. Hierbei fallen nur die Nutzungskosten der Hardware und die Personalkosten des Mitarbeiters an. Durch Wiederholungen kann sich der Lerneffekt steigern. [Gmbc]

Die intensive Schulung von Installateuren hat den Vorteil, dass die praktische Installation am Ende schneller voranschreitet. Somit können Kosten gespart werden, beispielsweise wenn Geräte wie eine Hebebühne zur Montage gemietet werden müssen und der Installateur statt zwei Tagen nur einen benötigt. Gleichzeitig kann auch eine bessere Qualität der Montage der Messstelle sichergestellt werden, da der Monteur mit den speziellen Anforderungen der Technik vertraut ist. Im Ergebnis ist eine höhere Messsicherheit zu erwarten, somit auch eine geringere Reklamationsquote.

Gegenüber diesen Vorteilen stehen auch Nachteile, insbesondere die Abgrenzung zur Realität stellt zurzeit noch eine Hürde dar. Zum einen muss aufgrund der physikalischen oder Simulationsgrenzen häufig auf einige Details verzichtet werden, daher sind die Simulationen meist vereinfacht.

Diese Vereinfachungen könnten dafür sorgen, dass der Nutzer in der Realität die Handlungen aus der virtuellen Welt nicht replizieren kann.

Ebenso ist es möglich, dass bestimmte Szenarien in VR deutlich einfacher zu lösen sind als in der realen Welt. Hier sei etwa das obige Feuerwehrtraining erwähnt.

In der Realität erfährt der Nutzer deutlich größeren körperlichen Stress durch die Hitze und Sichtbedingungen. Zusätzlich ist der Nutzer hier der realen Gefahr ausgesetzt. Ergänzend ist dies auch eine aufwendig zu simulierende Anwendung, da Feuer von vielen Faktoren abhängt und somit die Reaktion nicht unbedingt vollständig berechenbar ist.

Daher könnte eine ausschließliche VR-Schulung an dieser Stelle zu schlecht ausgebildetem Personal führen.

Dementsprechend kann das VR-Training nicht ohne begleitendes, reales Training umgesetzt werden. Als Ergänzung hierfür können dabei aber Techniken und Routinen durch die kontrollierte Umgebung gut erlernt und vertieft werden.

3.2.4 Fazit

Im Rahmen der Montage des Clamp-On Ultraschall Energiemessgeräts kann eine VR-Schulung gut eingesetzt werden, da hier keine Extremsituationen oder sehr komplexe Vorgänge simuliert werden müssen.

Die Simulation der Strömungseinflüsse und des Ultraschallverhaltens ist in 3D und VR sehr ressourcenintensiv. [Mor+20] Im Rahmen der Grundlagenschulung kann darauf verzichtet werden. Da hier dem Nutzer lediglich die Grenzbereiche der Installationen, welche durch den Hersteller vorgegeben sind, gezeigt werden. Sollte der Nutzer diese überschreiten, muss an dieser Stelle keine akkurate Simulation durchgeführt werden, sondern durch die Software ein entsprechender Fehler dargestellt werden.

Die Hydrauliksimulation wäre für die Prüfung von komplexen Anwendungsfällen sinnvoll, beispielsweise sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten oder enge Platzverhältnisse. Dies soll jedoch nicht Thema dieser Arbeit sein.

Die Vorteile der in dieser Arbeit entwickelten VR-Schulung liegen darin, dass kein Herstellerpersonal mehr für Schulungen zu den Kunden reisen muss und der Kunde auch neue Mitarbeiter zu späteren Zeitpunkten ohne erneuten Anschaffungsaufwand schulen kann. Ebenso kann der Nutzer explorativ das Messgerät kennenlernen.

Obwohl diese Schulung die Realität vereinfachen muss, kann ein unerfahrener Mitarbeiter seine Fähigkeiten vermutlich stärker schulen, als wenn er lediglich die Bedienungsanleitung zur Verfügung hat. Dies kann durch direkte Hinweise auf Missverständnisse und Fehler des Nutzers bei der Bedienung des Gerätes unterstützt werden.

3.3 Unreal Engine

Um die Erstellung von 3D-Anwendungen zu erleichtern, können Game Engine wie Unreal Engine verwendet werden.

Eine Game Engine ist ein Programm, welches viele grundlegende Funktionalitäten von gängigen Anwendungen bereits integriert hat. Ein Beispiel hierfür ist die Simulation der Physik wie Schwerkraft, Kollisionserkennung oder aber auch der allgemeine Renderingprozess. Darauf basierend kann eine komplexere Anwendung erstellt werden.

Ein weiteres Kernelement einer solchen Engine ist die Benutzeroberfläche. Über diese kann in Unreal Engine unter anderem die 3D-Umgebung erstellt werden.

Hierzu können zunächst 3D-Objekte in das Projekt importiert werden und dann per Mausklick in die Welt gezogen, platziert, skaliert und rotiert werden.

Überdies ist ein weiterer wichtiger Baustein das sogenannte *Blueprint*.

Blueprints sind Entwurfsvorlagen für komplexere 3D-Objekte.

Für simple Konstruktionen können hier unter anderem 3D-Objekte zueinander ausgerichtet werden.

Ein Beispiel hierfür wäre ein Lagerfeuer, wenn dies kein fertiges 3D-Objekt ist, könnten mehrere Quader als Holzscheite in der Mitte gestapelt und runde Objekte als Steinbegrenzung platziert werden.

Nun könnte dieses neu erstellte Objekt mehrfach in die Szene geladen werden, ohne dass es jedes Mal neu aufgebaut werden muss.

Dies ist besonders dann hilfreich, wenn einige Basisobjekte vorhanden sind, welche zu unterschiedlichen Konfigurationen zusammengestellt werden sollen.

Weiterhin kann ein solches neues Objekt automatisiert werden oder auf Interaktionen reagieren.

So könnte noch ein zweites Objekt, ein Feuerzeug, erstellt werden. Wenn dieses Objekt an das Lagerfeuer gehalten wird, wird eine Flamme als Animation gestartet.

Außerdem können Parameter für das Objekt festgelegt werden, so könnte ein Parameter *WoodCount* beispielsweise bestimmen, wie viele Holzscheite auf dem Feuer liegen, diese können entweder vom Blueprint selbst, von anderen Blueprints oder vom Nutzer innerhalb der Szene verändert werden.

Gleichzeitig ist auch eine Vererbung möglich, sodass etwa ein Fahrzeugblueprint erstellt werden kann, dies würde die grundlegenden Fahrzeugfunktionen definieren, als Kindklassen könnten dann etwa ein Kleinwagen, Kombi sowie ein Van erstellt werden. Bei diesem Ansatz müssten in den Kindklassen dann nur die Unterschiede definiert und gegebenenfalls Funktionen aus der Elternklasse überschrieben werden.

Dies sorgt für eine einfachere Wartbarkeit und weniger Fehlerpotenzial.

Die Blueprint-Funktionen können sowohl mithilfe eines visuellen Graphen mit verschiedenen definierten Knoten erstellt als auch mit C++ als Programmiersprache definiert werden.

Ferner gibt es eine Reihe weitere Funktionen, welche auf der Webseite⁴ des Herstellers nachvollzogen werden können.

Blueprint: Eine Art Baustein, der durch den Programmierer erstellt wird und beliebig oft auf der Karte eingefügt werden kann. Besteht meist aus einer Kombination von geometrischen Objekten und Code, welcher Funktionen zu den Objekten hinzufügt, bspw. eine öffnende Tür.

⁴Unreal Engine Webseite: <https://www.unrealengine.com/de>

3 Grundlagen

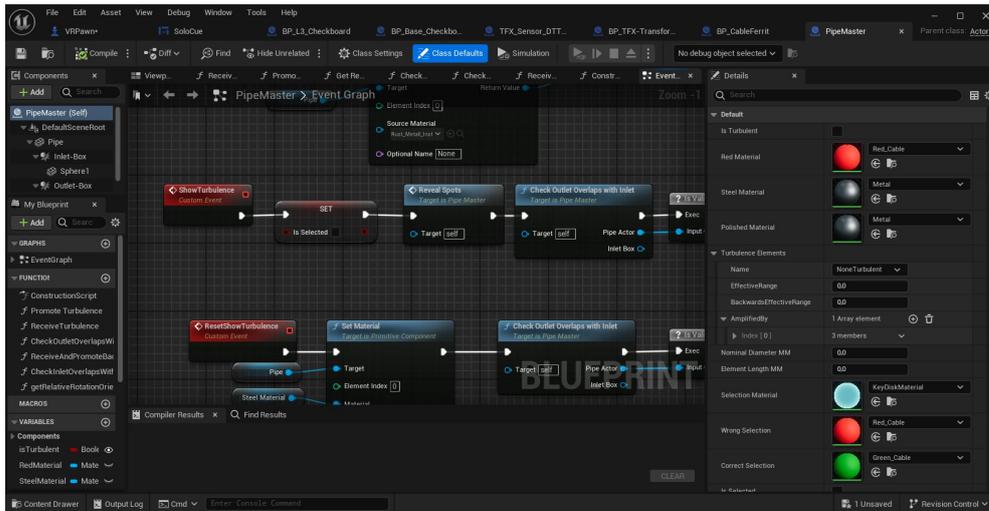


Abbildung 6: Der Blueprint Graph zur intuitiven Funktionserstellung.

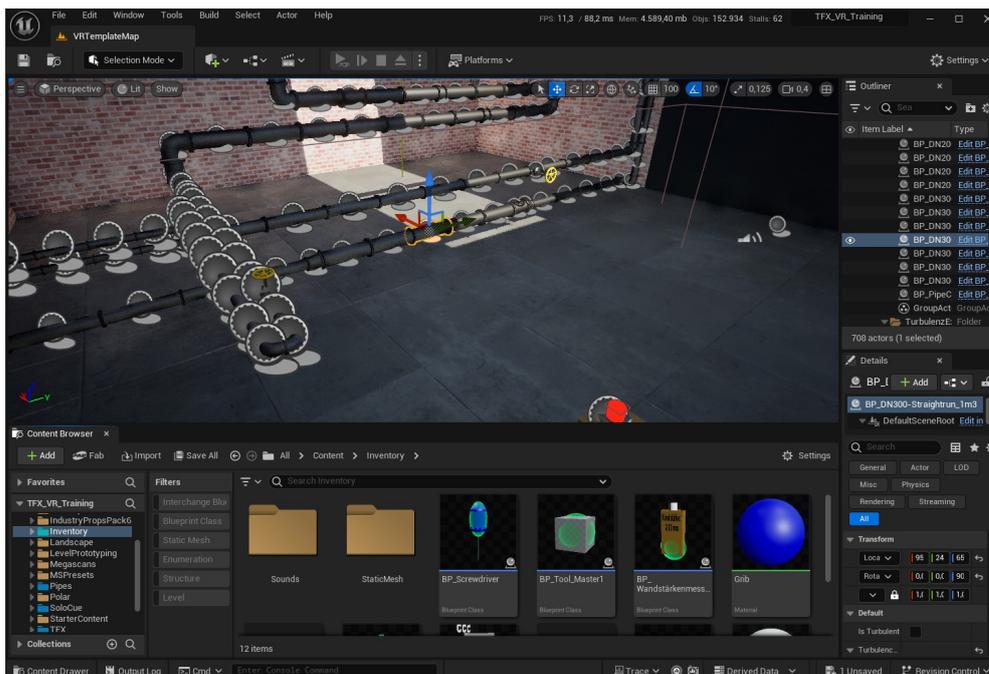


Abbildung 7: Der Unreal Editor, unten ist die Bibliothek zu sehen, in der Mitte die Szene, rechts am Rand ist eine Übersicht über die Objekte dieser Szene und die Parameter des ausgewählten Objekts.

Kapitel 4 RECHERCHEN ZU CLAMP-ON ULTRASCHALL ENERGIEMESSUNGEN

Im Folgenden werden die Anforderungen an eine Schulung zur Anwendung eines Clamp-On Ultraschall Energiemessgerät erhoben. Dazu werden zum einen die speziellen Anforderungen des TFX-5000 Energy und zum anderen, die allgemeinen Anforderungen an Clamp-On Ultraschall Messtechnik erhoben. Außerdem wird herausgestellt, welche Fehler besonders häufig von unerfahrenen Anwendern gemacht werden.

Um dies zu erreichen, wurden verschiedenste Quellen verwendet.

- Betriebsanleitung des TFX-5000 Energy sowie der Sensoren, siehe Anhang.
- Nicht öffentliche Dokumente.
- Webquellen: [Mor22], [Inc], [ala].
- Buch: Hydrometrie 2. Auflage von Gerd Morgenschweis [Mor18].
- Buch: Durchflüsse messen, regeln, dosieren, überwachen und registrieren von Heinz G. Erb und Horst Gras, [Hei24]
- Interviews/ E-Mails: Marcin Kubat, Bartosz Bartosiewicz, Stephen Shilcock (Badger Meter Europa GmbH) | Marc Blecker, André Wernicke-Gärtner (H. Hermann Ehlers GmbH) | Samuel Deckert, Sven Mehlhase (GWF Technologies GmbH) | Weitere Personen, keine Nennung erwünscht.

Die interviewten Personen haben mehrere Jahre, teilweise mehr als 30 Jahre, Erfahrung im Support, sowie der Installation von Clamp-On Messgeräten und allgemeinen Ultraschalldurchflussmessungen. Aus den nicht öffentlichen Dokumenten wurden keine Inhalte übernommen, diese haben lediglich zum Verständnis der gesamten Thematik beigetragen.

Kapitel 5 SCHULUNGSKONZEPT

Zu Beginn wird ein Grundkonzept für die Schulung entworfen. Dies gliedert sich in die Entwicklung der Schulungsinhalte und die Verpackung in ein didaktisches, sowie einem Interaktionskonzept.

5.1 Anforderungen und Inhalte

Die Anforderungen gliedern sich in zwei Teile, zum einen die meist mechanischen Anforderungen an den Ort und zum anderen die meist weichen Faktoren an die Inbetriebnahme.

5.1.1 Anforderungen an den Installationsort

Der Installationsort wird zum einen durch die mechanischen Bedingungen bestimmt. Dies sind unter anderem die folgenden Faktoren:

- Zugänglichkeit der Rohrleitung.
- Montageort der Ultraschall-Sensoren.
- Platz für den Messwertumformer.
- Distanz zwischen Vor- und Rücklaufleitung der Heizung.
- Kabellänge des Ultraschallsensors und der Temperaturfühler.

Überdies gibt es noch Anforderungen an das Strömungsprofil im Rohr.

Das Messgerät erfasst die Fließgeschwindigkeit nur an einem Pfad in der Rohrleitung, siehe Kapitel Grundlagen.

Durch Formeln kann diese Fließgeschwindigkeit in die im gesamten Querschnitt durchschnittliche umgerechnet werden.

Bei der Berechnung wird von einem rotations-symmetrischen, turbulenten Strömungsprofil ausgegangen. Dieses bildet sich, vereinfacht dargestellt, abhängig von Medium und Nennweite, ab einer bestimmten Fließgeschwindigkeit innerhalb einer geraden Rohrleitung.

Ist vor der Messstelle ein Störkörper wie ein 90° Bogen, wird dieses Strömungsprofil verändert. Durch diese Veränderung ist die berechnete mittlere Fließgeschwindigkeit nicht mehr korrekt. Dies führt zu Messfehlern im Volumenstrom gemäß der eingeführten Formel $Q = v * A$ entsprechend der Größe der Geschwindigkeitsabweichung.

Zu diesen Störkörpern soll grundsätzlich ein größtmöglicher Abstand eingehalten werden, es gelten hier aktuell folgende Werksangaben:

- Einzelner 90° Bogen - 5x DN⁵ vor dem Element, 10x DN hinter dem Ele-

⁵DN beschreibt den Innendurchmesser einer Rohrleitung.

ment.

- Doppel Bogen, auf einer Achse 90° verdreht⁶ - 5x DN, 14x DN.
- Doppel Bogen, auf zwei Achsen 90° verdreht⁷ - 5x DN, 24x DN.
- Ventil oder Schieber - 5x DN, 10x DN.
- Kaliberwechsel - 5x DN, 10x DN.
- Nicht aufgeführte Elemente - mindestens 5x DN, 10x DN.
- Bei weniger Platz - $\frac{2}{3}$ des verfügbaren Platzes im Einlauf und $\frac{1}{3}$ im Auslauf der Messung eingehalten werden.

Grundsätzlich ist auch der Zustand der Rohrleitung wichtig, ist das Rohr deformiert oder sind starke Ablagerungen im Rohr vorhanden, kann dies die Messung negativ beeinflussen. „The pipe is the primary element“ zitiert aus einem Interview mit Herrn Kubat 2024. Dies meint: ist die Rohrleitung im schlechten Zustand, ist das Messergebnis schlecht. Bei den klassischen Einbaumessgeräten ist dies teilweise nicht relevant, da hier der Messkörper des Einbauzählers die Messstrecke ist und die Rohrleitung an dieser Stelle entfernt wird.

5.1.2 Anforderungen an die Inbetriebnahme

Für die Inbetriebnahme muss der Messumformer parametrierbar und die Messaufnahme montiert werden.

Hier gilt es, dem Nutzer den grundlegenden Vorgang der Parametrierung und Montage näher zu erläutern. Auch muss ein Verständnis der Faktoren vermittelt werden, die die Messgenauigkeit einschränken.

Die Genauigkeit der angegebenen Parameter ist ein elementarer Faktor für eine qualitative Inbetriebnahme. Gerade falsche Einheiten oder ungenaue Angaben bei den Rohrdimensionen führen schnell zu größeren Messfehlern. Verschiedene Interviewpartner wiesen hier explizit darauf hin, da einige Installateure die Werte grob schätzen. Am häufigsten wird bei der Rohrwandstärke eine falsche Angabe gemacht, da hier ein zusätzliches Messgerät erforderlich ist, daher wird diese oft geschätzt.

Falsche Angaben zu Medium, Temperatur und Rohrmaterial führen ebenfalls zu Fehlern, da über diese Werte die Referenzlaufzeit berechnet wird. Bei zu großen Abweichungen ist eine Messung nicht möglich, bei kleineren Abweichungen kann es zu Messfehlern kommen.

Die Abstandsberechnung basiert ebenfalls auf den obigen Werten. Durch Fehler bei diesen Parametern wird der Schallweg falsch berechnet. Der Schallweg und die Laufzeit hängen unter anderem mit der Schallbrechung zusammen.

⁶Dadurch ergibt sich eine U- oder S-Form der Bögen, sodass die Rohrleitung die Richtung wechselt oder einen Versatz bildet.

⁷Hier kann beispielsweise die Rohrleitung zunächst etwas nach oben geführt und unmittelbar dahinter nach rechts oder links abgelenkt werden.

Die Brechung wird von der Schallgeschwindigkeit bestimmt. Hat das Medium, in dem sich der Schall bereits befindet, eine höhere Schallgeschwindigkeit als das Medium, in das es übertritt, so ist der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel. Ist dies umgekehrt, so ist der Brechungswinkel größer. [Zür] Dieser kann durch das Snelliussches Brechungsgesetz berechnet werden. [alb] Dies kann ebenfalls zu einem Signalausfall oder Messfehlern führen.

Über die Parametrierung hinaus ist es wichtig, dass der vom Messgerät berechnete Abstand korrekt zwischen den Sensoren eingehalten wird, ansonsten kommt es zu den oben beschriebenen Fehlern.

Für eine optimale Signalübertragung ist es wichtig, die Rohrleitung vor Inbetriebnahme von Rost und Farbbreständen zu befreien und eine akustische Koppelpaste aufzutragen. Auch hier zeigen die Interviews, dass dies eine häufige Fehlerquelle ist.

Bei den Temperaturfühlern ist wichtig, dass die richtige Auswahl in der Software getroffen wird, hier wird der Sensortyp, Messbereich und Differenztemperatur (ΔT) Bezug gewählt, so wie optional ein Abgleich hinterlegt. Es können hier ein PT100 oder ein PT1000 je mit drei oder vier Adern gewählt werden. Die Temperaturfühler unterscheiden sich in der Auflösung beziehungsweise Temperaturkoeffizienten und dem Widerstand des Fühlers bei null Grad. Ein PT100 hat einen Widerstand von 100 Ohm bei null Grad und einen Temperaturkoeffizienten von $0,4\Omega/K$, der PT1000 hingegen hat einen Widerstand von 1000 Ohm bei null Grad und einen Temperaturkoeffizienten von $4\Omega/K$. [Wag] [Mar]

Ob ein Drei- oder Vierleiter verwendet wird, lässt sich durch die Aderzahl am Anschlusskabel erkennen. Ein Vierleiter ist besonders bei unterschiedlich langen Anschlusskabeln relevant, da durch die vier Adern ein Widerstandsunterschied im Kabel kompensiert werden kann. [Gie]

Für die Installation ist auch hier ein sauberes Rohr wichtig, sowie die Verwendung von Wärmeleitpaste. Zum Schluss sollte der Sensor isoliert werden, um Einflüsse der Umgebungstemperatur zu minimieren.

Wird der Fühler zwischen Vor- und Rücklauf vertauscht, so wird eine negative Energiemenge berechnet.

Die korrekte Verkabelung aller Sensoren am Messumformer ist unerlässlich, Fehler hier führen zu einem Totalausfall oder es wird ein negativer Energie-/Durchflusswert erfasst.

5.2 Didaktisches Konzept

Für das richtige Format der Schulung sind zunächst die Lernziele festzulegen. Durch eine mehrwöchige Schulung mit Methoden wie Brainstorming, Experimenten und problemorientierten Lernen können Menschen zu Experten dieser Messtechnik ausgebildet werden. Dies wäre für Hersteller und Serviceanbieter von Bedeutung, allerdings ist VR als einziges Mittel vermutlich nicht die richtige Wahl.

Für die meisten Kundenanwendungen ist es nicht unbedingt erforderlich, jedes Detail dieser Messtechnik zu kennen.

Folglich ist die Schulung auf Endanwender, etwa Elektroinstallateure fokussiert. In diesem Rahmen gilt es, einer Person, welche noch keine oder wenig Erfahrung mit dieser Messtechnik hat, die wichtigsten Grundlagen und Vorgehensweisen zu vermitteln.

Ziel ist, die höchste Messgenauigkeit zu erreichen und dass die Person die gängigsten Fehlerquellen erkennt und fehlerhafte Installation korrigieren oder vermeiden kann. Dies lässt sich über mehrere Möglichkeiten erreichen:

- Schulung durch theoretischen Frontalunterricht/ Videopräsentationen
- Schulung durch Vorführung einer Installation, auch als Video.
- Direkte Anleitung und Betreuung bei einer realen Installation durch eine erfahrene Person.

Nach dem Zitat „Sage es mir, und ich werde es vergessen. Zeige es mir, und ich werde es vielleicht behalten. Lass es mich tun, und ich werde es verstehen“ Konfuzius 551–479 v. Chr. sind erfahrungsgemäß, theoretische Unterweisungen im begrenzten Umfang notwendig und hilfreich. Diese führen aber andererseits schnell dazu, dass zu viel vermittelt wird und wenig behalten/ umgesetzt werden kann.

Es kann das Verständnis für die Messtechnik durch das Anschauen eines Installationsvideos gesteigert werden, jedoch wird dabei die eigene Handlung zur Vertiefung vernachlässigt.

„Learning by doing“ kann den Lerneffekt steigern, wenn es richtig begleitet wird. [Joh17]

Durch die eigene Handlung werden die Erkenntnisse und Gedanken in konkrete Aktivitäten umgesetzt. Dies führt häufig zu Herausforderungen, da etwas doch ein wenig anders ist als erdacht. Diese kleinen Herausforderungen können mit einer gezielten Unterstützung gelöst werden und dazu führen, die Thematik vollständiger zu verstehen und zu verinnerlichen. [Möl04]

Im klassischen Sinne wird die praktische Umsetzung durch ein 1 : N Coaching in der Anlage durchgeführt. Diese klassische Schulung soll in dieser Arbeit

durch ein interaktives VR-Erlebnis ersetzt werden.

Innerhalb der Schulung selbst soll der Nutzer einen Mix aus eigenen, möglichst realitätsnahen Handlungen durchführen. Gleichzeitig soll er durch kurze Videos mit einer erklärenden Stimme durch die einzelnen Schritte einer Installation und deren Rahmenbedingungen geführt werden.

Auf die theoretische Schulung kann auch in diesem Fall nicht komplett verzichtet werden, daher soll vor Beginn der VR-Schulung eine kurze Videounterweisung zum Thema „Physikalische Hintergründe der Clamp-On Energiemesstechnik“. Dieses Video soll dem Nutzer zunächst die Hintergründe der Messtechnik näher bringen. Dadurch soll der Nutzer in der interaktiven Schulung selbst Verbindungen zu dem vorher gezeigten Wissen aufbauen und festigen.

5.3 Interaktionskonzept

Um dem Nutzer die Interaktionen in der virtuellen Welt möglichst einfach zu gestalten, wird ein möglichst konsistentes Interaktionskonzept festgelegt.

So haben alle greifbaren Gegenstände eine grüne Sphäre um den Bereich, an dem sie vom Nutzer gehalten werden können. Hat ein Objekt keine Sphäre, ist es nicht möglich, dieses in die Hand zu nehmen.

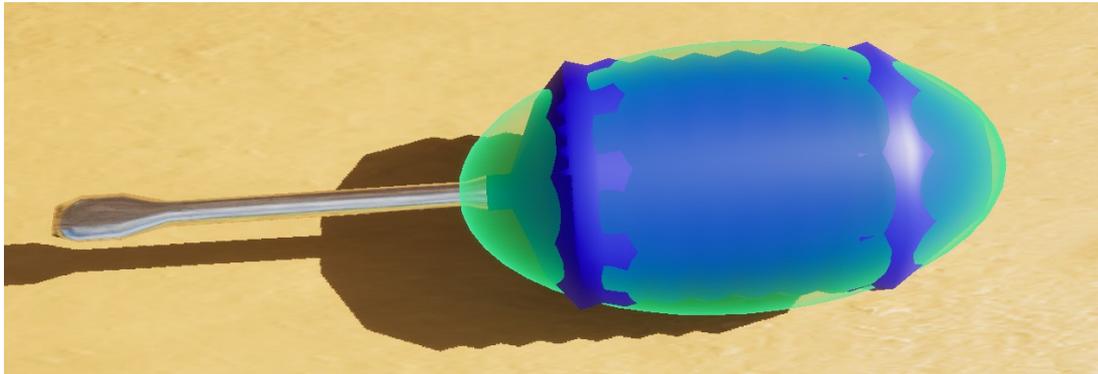


Abbildung 8: Ein Beispielobjekt, welches in die Hand genommen werden kann.

Ferner werden verschiedene Interaktionsrückmeldungs-Hinweise eingebaut. So vibriert etwa der Controller, wenn ein Gegenstand aufgehoben wird oder wenn eine Interaktion mit diesem Gegenstand möglich ist. Im Folgenden wird dies auch als *Force-Feedback* bezeichnet. Ein Beispiel ist hierfür ein Schraubendreher, welcher eine Schraube berührt. Damit der Nutzer ein Objekt aufheben kann, muss er seine Hand möglichst nah an das Objekt heranhalten, dieses wird dann „magnetisch“ in die Hand platziert. Um diese Bedienung realistisch

Force-Feedback: Eine physische Rückmeldung des Eingabegerätes. Dies wird häufig durch ein Vibrieren des Gerätes umgesetzt.

zu halten, muss der Nutzer seine Hand sehr nah an das Objekt bewegen. Ein Aufheben aus größerer Entfernung soll nicht möglich sein. Sobald der Nutzer die Greiftaste loslässt, fällt ihm zudem das Objekt aus der Hand, dies kommt dem Handöffnen in der physischen Welt nahe.

Wenn eine Interaktion länger dauert, wird die Dauer der Interaktion durch ein akustisches Signal untermalt, dieses stoppt, sobald die Interaktion beendet ist. Ist eine Interaktion nur von sehr kurzer Dauer, wird das Ende dieser Interaktion durch ein akustisches Signal wie ein „klicken“ oder Ähnliches bestätigt. Gleichzeitig erhält der Nutzer bei Interaktionen, die fehlerhaft ausgeführt werden können, ein akustisches Signal, ob die Interaktion fehlerfrei durchgeführt wurde.

Bei einigen Interaktionen wird zusätzlich noch ein optisches Signal eingeführt, hierbei färbt sich der Gegenstand entweder grün bei einer erfolgreichen oder rot bei einer fehlerhaften Interaktion.

Darüber hinaus muss ein Bewegungskonzept festgelegt werden. Zum Zurücklegen von unterschiedlichen Distanzen in der virtuellen Welt gibt es drei weitverbreitete Konzepte und einige weitere.[Meta] Im Folgenden werden die am besten passenden Konzepte kurz vorgestellt:

- Bewegung in der virtuellen Welt nur durch Bewegung im realen Raum.
- Kontinuierliche Fortbewegung durch einen Joystick, ähnlich zu klassischen First-Person-Desktop-Spielen.
- Teleportation von Standpunkt zu Standpunkt.

Das erste Konzept ist lediglich für kleine virtuelle Welten geeignet, da ansonsten große physische Räume zur Fortbewegung benötigt werden. Die kontinuierliche Bewegung über einen Joystick wird häufig mit dem ersten Konzept verbunden, da sich der Nutzer auch in der physischen Welt bewegen wird, etwa eine Bewegung des Kopfes, um etwas besser erkennen zu können. Diese Fortbewegungsform ist zwar intuitiv, allerdings verursacht sie bei unübten Nutzern häufig *Motion-Sickness*, da die mit den Augen wahrgenommene Bewegung nicht zu der des Gleichgewichtsorgans passt. [Oka23] Bei der Teleportation hingegen bewegt sich der Nutzer in Abschnitten, so vergehen zwischen der Bewegung von einer Position zu anderen nur wenige Sekunden unabhängig von der Distanz. Dadurch entsteht eine kontinuierliche Bewegung nur durch das Bewegen in der realen Welt. Dies sorgt für weniger Probleme mit Motion-Sickness. Die Teilnehmer der Schulung haben vermutlich aufgrund der geringen Verbreitung von VR wenig Erfahrung mit diesem virtuellen Medium. Daher soll die Bewegung mithilfe von Teleportation durchgeführt werden.

Motion-Sickness: Ein Nutzer erfährt Schwindel, Übelkeit oder ähnliche Probleme, während er ein VR-System benutzt. Dies kann durch unterschiedliche Reize ausgelöst werden.

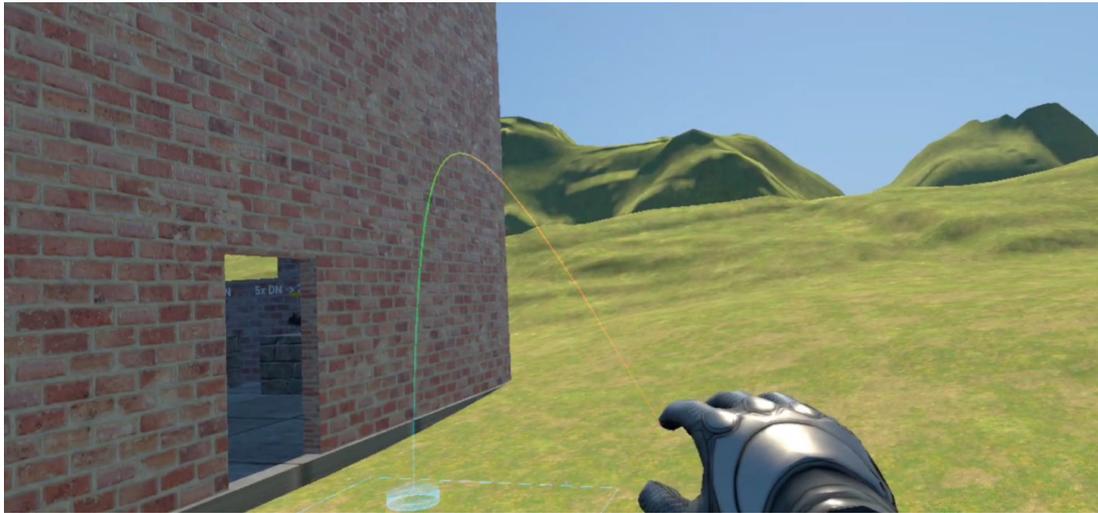


Abbildung 9: Ein Teleportvorgang.

Bei der Drehung im Raum gibt es ähnliche Konzepte:

- Drehung in der virtuellen Welt durch Drehung im physischen Raum.
- Kontinuierliche Drehung durch den Joystick.
- Segmentierte Drehung durch den Joystick.

Die Drehung in der physischen Welt ist für den Nutzer intuitiv, da er diese Bewegung aus der realen Welt kennt, eine alleinige Implementierung dieser kann jedoch zu Problemen an physischen Raumgrenzen führen. Durch eine Kombination mit Joystick-Drehung kann der Nutzer sich in der physischen Welt passend zum Raum ausrichten und dann die Sicht in der virtuellen Welt anpassen. Dadurch hat der Nutzer mehr Bewegungsfreiraum in der physischen Welt. Bei den Joystick-Drehungen gilt ähnliches wie bei der Fortbewegung, auch hier kann eine kontinuierliche Drehung zu Motion-Sickness führen. Daher wird die segmentierte Drehung als Zusatz zur physischen Drehung verwendet.

Kapitel 6 **BESCHREIBUNG DER EINZELNEN MODULE**

Die Schulung ist in fünf aufeinander aufbauende Module aufgeteilt, davon werden 4 in VR durchgeführt. Das Konzept sieht dabei vor, dass der Nutzer zunächst theoretische Informationen erhält, ab Modul zwei kann er diese dann durch Handlungen festigen.

Im Folgenden werden die Module genauer erläutert.

6.1 Video-Modul: Grundlagen der Ultraschall-Energiemesstechnik

Bevor der Nutzer an der VR-Schulung teilnimmt, sollte er über die Grundlagen dieser Messtechnik unterwiesen werden.

Hierzu wird vorab ein kurzes Video-Modul gezeigt, in diesem Modul werden die folgenden Inhalte näher erläutert:

- Was ist Ultraschall?
- Wie kann die Durchfluss- und Energiemenge gemessen werden?
- Wie funktioniert dies mit Ultraschall?
- Welche Fehlerquellen gibt es, hier insbesondere Ein-/Auslaufstrecken.

Die Ein- und Auslaufstrecken sind für die exakte Erfassung der Fließgeschwindigkeiten und somit der Energiemessung von großer Bedeutung. Folglich werden diese in einigen Modulen wiederholt vorkommen.

6.2 VR Startumgebung

Vor dem ersten Modul befindet sich eine Startumgebung. In dieser Umgebung wird dem Teilnehmer durch ein Video die Steuerung in der virtuellen Welt und das Ziel der Schulung erläutert.

Zusätzlich findet sich hier ein Messumformer und ein Schraubendreher. Mit diesem Werkzeug können die Teilnehmer die Handhabung von Gegenständen in der Schulung ausprobieren.



Abbildung 10: Die Startumgebung, links im Bild, ist das Einführungsvideo, rechts im Bild das Übungsobjekt.

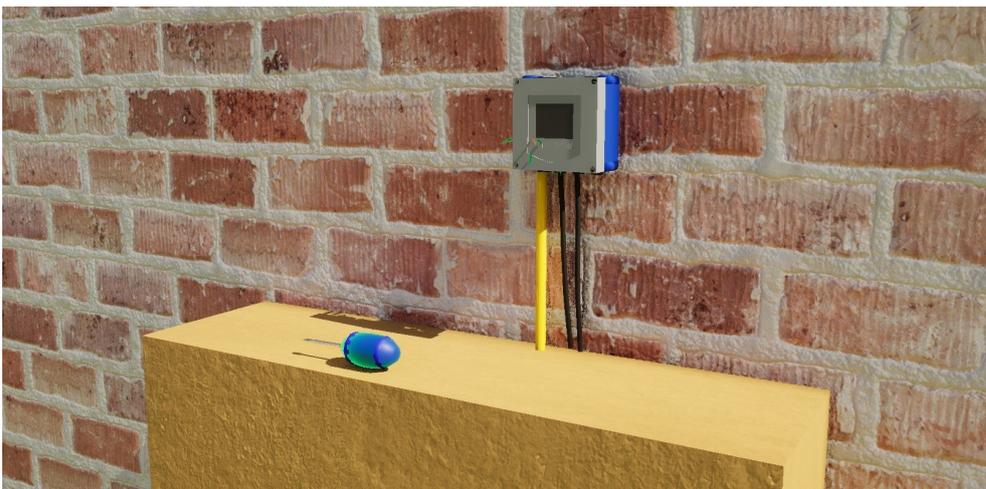


Abbildung 11: Der Messwertumformer, ein Teilnehmer kann hier vier Schrauben in den Ecken des Gehäuses lösen, um die Interaktion zu üben.

6.3 1. Modul: Einschätzung von möglichen Installationsorten

Im ersten Modul werden die Ein- und Auslauf Distanzen für unterschiedliche Rohrnennweiten und Störkörper visualisiert, sodass der Nutzer in einer Anlage auf den ersten Blick eine grobe Einschätzung von möglichen Installationsorten vornehmen kann.

Der Nutzer kann die Rohrleitung zunächst ohne Visualisierungen betrachten, nachdem er einen Knopf betätigt, wird der nicht messbare Bereich der Rohr-

6 Beschreibung der einzelnen Module

leitung in Rot eingefärbt und der messbare Bereich in Grün.

Dazu eignet sich VR besonders, da dort Größenverhältnisse besser eingeschätzt werden können.

Überdies sind in diesem Modul einzelne Rohrsegmente wie ein 90° Bogen oder ein Ventil als Ausstellungsstück mit Angaben der einzuhaltenden Abstände zu diesen Elementen zu betrachten. Dies ist eine Wiederholung und Erweiterung aus dem Grundlagenvideo und soll dazu beitragen, dass der Teilnehmer die Ein-/Auslaufstrecken besser versteht und einschätzen kann.



Abbildung 12: Die Rohrleitungsexponate.

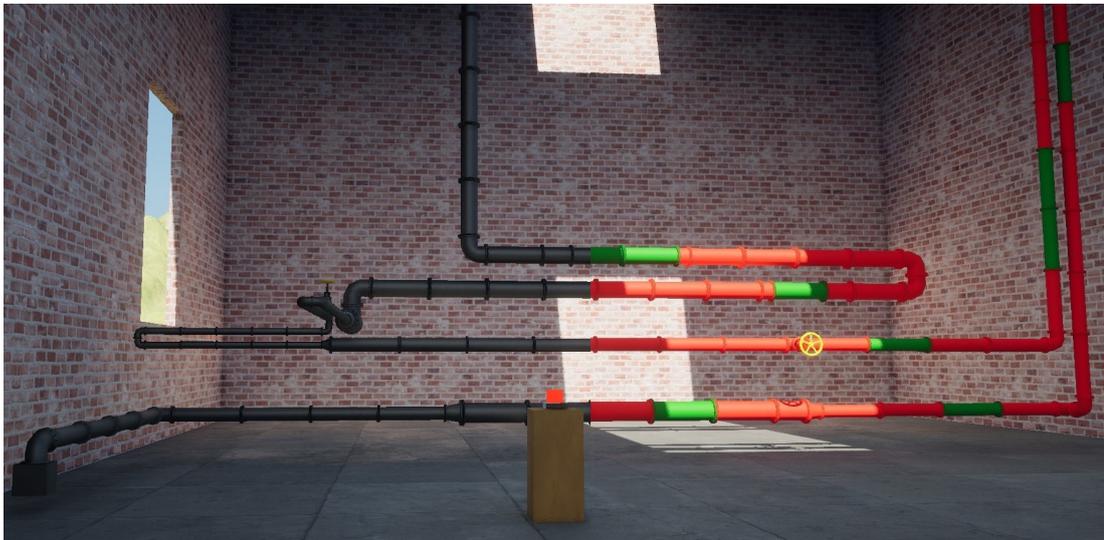


Abbildung 13: Die Verwirbelungsvisualisierung, links inaktiv, rechts aktiviert.

6.4 2. Modul: Vertiefung der Distanzen

Im nächsten Modul sollen die einzuhaltenden Distanzen vertieft werden, dazu wird der Teilnehmer nun zur aktiven Handlung geführt.

Hier werden dem Nutzer unterschiedliche Rohrleitungsausschnitte gezeigt. Der Nutzer soll mithilfe eines Laserpointers die Segmente markieren, an denen eine Messung möglich ist. Damit der Teilnehmer ein Feedback erhält, wird das Segment unmittelbar nach der Auswahl rot oder grün gefärbt und ein entsprechendes positives oder negatives Audiosignal abgespielt.

Um die Auswahl zu erleichtern, wird das vom Laserstrahl getroffene Element zunächst optisch hervorgehoben, sowie ein akustisches Signal abgespielt. Bestätigt der Nutzer die Auswahl, wird zusätzlich ein Force-Feedback im Controller ausgelöst.

Glaubt er, alle Segmente gefunden zu haben, kann er einen Knopf zur Auflösung drücken, daraufhin werden alle Segmente wie im Modul eins eingefärbt. Um die Motivation des Teilnehmers zu erhöhen, kann er in diesem Level Punkte sammeln, wobei er für jede richtige Selektion einen Punkt addiert und für eine falsche einen Punkt abgezogen bekommt.

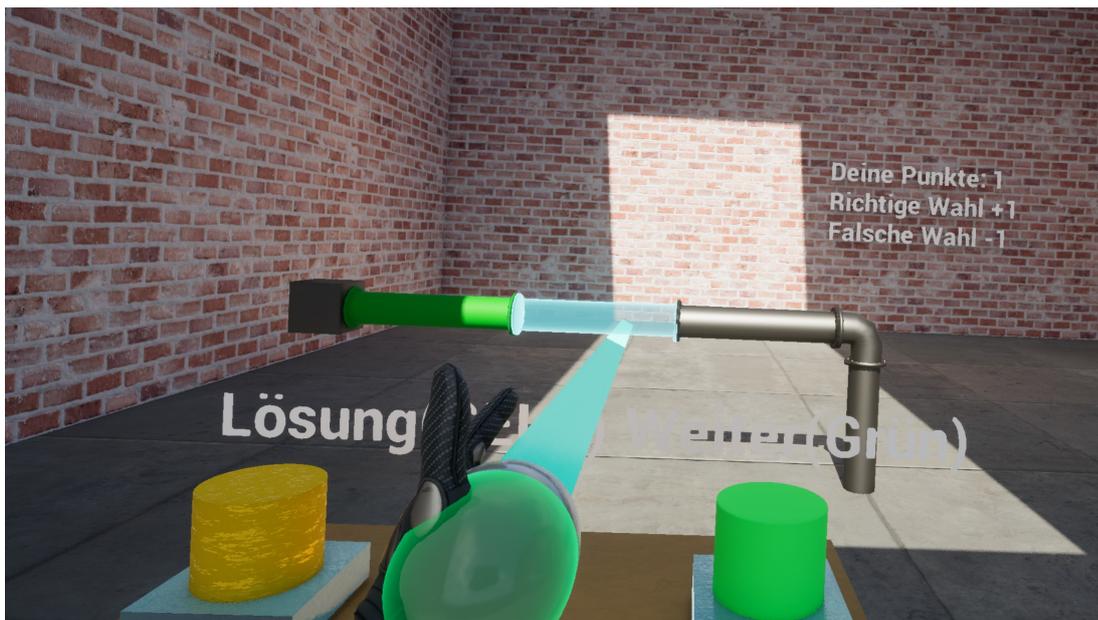


Abbildung 14: Die Selektion eines Rohrsegments mit dem Laserpointer im zweiten Modul.

6.5 3. Modul: Inbetriebnahme eines Clamp-On Energie-Messgeräts

Im dritten Modul wird der Nutzer in Etappen von der Parametererhebung bis hin zur Montage des Messgeräts durch kurze Videos geleitet.

Anders als in den vorherigen Modulen wird der Inhalt dieses Moduls auf mehrere kürzere Videos aufgeteilt. Das nächste Video wird immer dann abgespielt, wenn der Teilnehmer eine vorherige Aufgabe abgeschlossen hat. Im Folgenden wird nun dieses Modul im Detail erklärt.



Abbildung 15: Ein Überblick über Modul drei. Im Hintergrund ist eine der Videoanleitungen zusehen. An den Wänden sind die beiden Tafeln angebracht.

Damit der Nutzer sich besser zurechtfindet, sind an der Wand zwei Tafeln angebracht. Auf der im Bild 15 vorderen Tafel sieht der Nutzer eine Übersicht über alle für eine Inbetriebnahme nötigen Schritte. Diese sind zu Beginn rot und werden nach erfolgreichem Abschluss des Schrittes grün eingefärbt. Die hintere Tafel ist eine detailreichere Beschreibung des aktuellen Schrittes sowie eine Auflistung der während der Inbetriebnahme aufgetretenen Fehler. Sobald ein Nutzer einen Fehler erzeugt, wird er durch einen akustischen Hinweis auf diesen aufmerksam gemacht, zusätzlich erscheint dieser an der Tafel. Durch den Tafelhinweis erhält der Nutzer einen Lösungshinweis, sodass er den Fehler korrigieren kann. Wird der Fehler korrigiert, verschwindet er von der Tafel.

6.5.1 Parametererhebung

Zunächst muss der Nutzer die Anwendungsparameter erheben und einen Installationsort auswählen. Dazu kann der Nutzer sein Wissen aus den letzten Modulen und dem Grundlagenvideo einsetzen.

6 Beschreibung der einzelnen Module

Wird ein falscher Montageort gewählt, wird dies bei der Ultraschallsensormontage durch ein Einfärben der Rohrleitung in Rot dargestellt.

Hat er einen geeigneten Ort gefunden, müssen die Messstellenparameter erhoben werden, dazu verfügt er über einen Messschieber und ein Wandstärkenmessgerät.



Abbildung 16: Die Messung der Rohrparameter.

Insgesamt müssen für eine Messung folgende Parameter erhoben werden:

- Installationsort (Ein-/Auslaufstrecken, Deformierung der Leitung)
- Außendurchmesser (Messschieber),
- Rohrwandstärke (Messgerät)
- Rohrmaterial (Sollte bekannt sein oder in einem Plan stehen, hier wird es im Video erwähnt)
- Medium (Sollte bekannt sein, hier im Video erwähnt)
- Medium Temperatur (Kann an einer Anzeige abgelesen oder mit dem Temperaturfühler erfasst werden, hier wird es im Video erwähnt)

6.5.2 Anklemmen der Kabelenden am Messumformer

In dem nächsten Schritt sollen die Ultraschallsensor- und Temperaturfühler Kabel am Messumformer angeklemt werden.

Hierzu muss der Nutzer zunächst den Messumformer mit dem Schraubendreher öffnen und dann die Adern mithilfe des Schraubendrehers in den Klemmen befestigen.

Da das Drehen eines Schraubendrehers in VR teilweise komplizierter ist, wird

dies durch einen Knopfdruck am Controller ersetzt. Um die Verkabelung möglichst einfach zu gestalten, haben die Klemmen die entsprechende Aderfarbe. Dennoch muss der Nutzer darauf achten, welche Ader auf welche Klemme angeschlossen wird, da es mehrere gleichfarbige Adern gibt. Wie diese zugeordnet werden, wird im Video erläutert.

Weiterhin muss der Nutzer noch einen Ferritkern am Ultraschallsensorkabel montieren, damit elektrische Störeinflüsse gefiltert werden können. Auch hier wird die Realität vereinfacht, das Kabel muss in der Realität doppelt durch den Kern geführt werden. Dies ist mit der begrenzten Haptik in VR zu kompliziert, daher wird dies automatisch durch einen Knopfdruck erledigt.

Für die Verbindung zwischen Messumformer und Computer ist noch ein USB-Kabel anzuschließen.

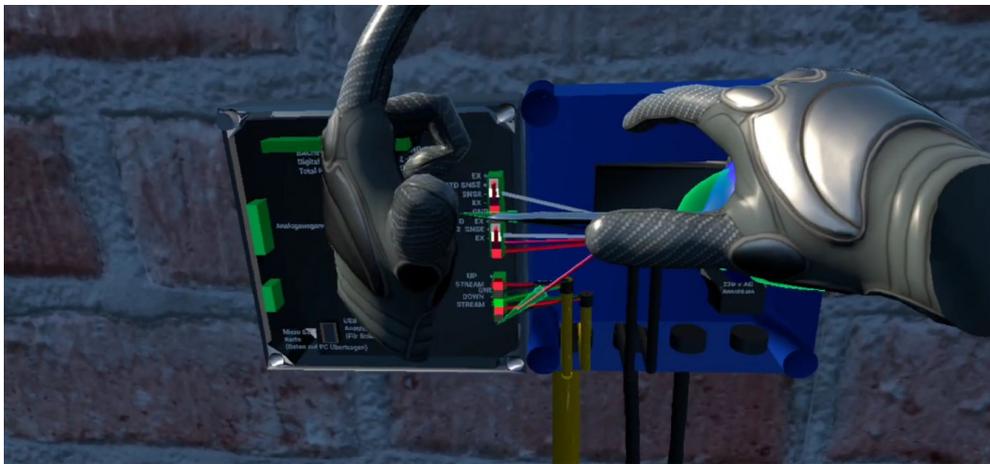


Abbildung 17: Die Kabelmontage.

6.5.3 Parametrierung mit Solocue

Durch die USB-Verbindung kann nun am Computer das Messgerät eingestellt werden.

Um die Interaktion zu vereinfachen, wird hier kein Computer simuliert und das USB-Kabel muss nicht am Computer eingesteckt werden. Daher wird *Solocue* vergrößert an der Wand dargestellt.

Welche Parameter eingegeben werden müssen und welche Optionen vorhanden sind, wird dem Nutzer parallel durch ein Video erläutert.

Zusätzlich erhält der Nutzer ein Audiofeedback, ob die ausgewählte Option korrekt ist.

Damit der Teilnehmer mit dem Programm interagieren kann, wird, sobald der Nutzer die Hand in Richtung Solocue hält, je ein Laserstrahl aus den Händen emittiert. Mithilfe eines Knopfes am Controller kann dann ein Feld angeklickt

Solocue: Eine Software des Messgeräteherstellers zur Parametrierung des TFX-5000 Energy mittels eines Computers.

6 Beschreibung der einzelnen Module

werden.

Da in fast allen Feldern nur Zahlen eingegeben werden müssen, erhält der Nutzer bei der Auswahl eines Zahlenfeldes einen Nummernblock im Programm, dieser kann mit den Lasern bedient werden.

Textfelder werden nicht angewendet, da diese für die Messung nicht von elementarem Nutzen sind. Überdies ist die Auswahl auf einer vollen Tastatur komplizierter für den Nutzer, da die Tasten kleiner gestaltet werden müssten.

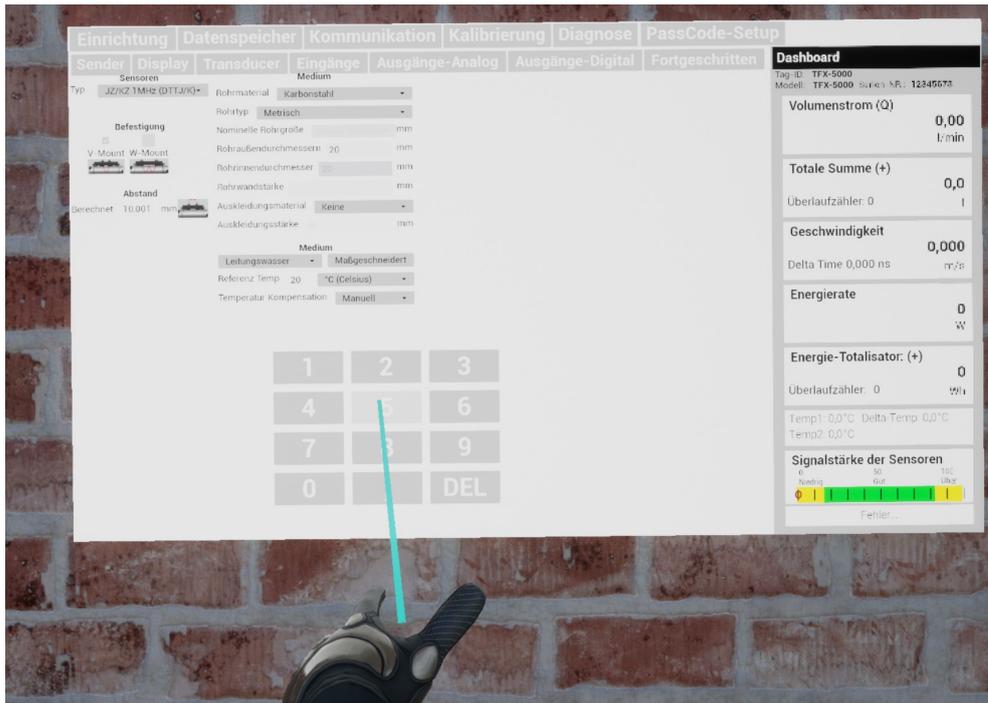


Abbildung 18: Eine Selektion in Solocue. Im unteren Bereich ist das Zehnerfeld zu erkennen. Links wird der Sensorabstand angezeigt.

6.5.4 Vorbereitung und Montage des Ultraschallsensors

Im Anschluss wird nun der von Solocue errechnete Abstand auf dem Sensor eingestellt. Dazu wird der Abstand in der Simulation mithilfe eines Textes über dem Sensor angezeigt. In der realen Welt ist auf dem Sensor ein Millimetermaß abgedruckt, anhand dessen der Abstand zwischen beiden Sensoren bestimmt werden kann. Diese Skala kann auf dem Bild 2 im Abschnitt Clamp-On Ultraschall Energiemessung angeschaut werden. Dies wäre aufgrund der Auflösung und Größe in VR schwierig ablesbar, daher wurde diese Vereinfachung gewählt.

Auf dem Ultraschallsensor befindet sich eine Feststelmutter. Diese muss gelöst werden, damit der Abstand eingestellt werden kann. Auch hier wurde dies

durch einen Knopfdruck am Controller vereinfacht und die Mutter animiert. Ein Festdrehen der Mutter ohne den Sensorabstand zu beeinflussen wäre motorisch, ohne den physischen Widerstand schwer.

Nach der Abstandseinstellung wird Koppelpaste auf den beiden Ultraschallsensoren platziert, dieser Vorgang ist ähnlich zu dem in der Realität.

Darauffolgend wird der Rost vom Rohr mithilfe eines Schleifpapiers entfernt und der Sensor am Rohr montiert. Auch hier gibt es eine Vereinfachung, in der Realität wird der Sensor mittels eines Spannbandes am Rohr befestigt. Ein solches Spannband kann mit Hilfe eines *Skeletal Meshes* dargestellt werden. Dieses Mesh ist in der physikalischen Simulation teilweise schwer zu kontrollieren. So ist es zwar möglich, dieses Band auf das Rohr zu legen, wirkt jedoch eine Kraft auf dieses Band, so misslingt die Kollisionsabfrage und dieses Band fällt durch das Rohr hindurch.

Damit ist es nicht benutzbar und wurde entfernt. In der Simulation hält der Sensor „magnetisch“ in dem die Physikberechnung nach der Platzierung deaktiviert wird.

Bei der Montage wird automatisch Folgendes geprüft und als Fehler angezeigt:

- Ist Rost auf der Leitung vorhanden?
- Ist genug Abstand zu Störkörpern eingehalten worden?
- Wurde Koppelpaste auf den Sensor aufgetragen?
- Ist der Sensorabstand korrekt eingestellt?
- Ist der Upstreamsensord auf der korrekten Seite? (Fließrichtung)
- Wurde der Sensor seitlich am Rohr montiert worden?

Skeletal Mesh: Ein 3D-Objekt, welches ein unsichtbares Skelett aus Knochen und Gelenken hat, dies kann dann animiert oder durch die Physik beeinflusst werden.



Abbildung 19: Die Ultraschallsensormontage auf einem vom Rost befreiten Rohr.

6.5.5 Temperaturfühler Montage

Als Nächstes wird auf die Temperaturfühler Wärmeleitpaste aufgetragen und diese entsprechend auf der Vor- und Rücklaufleitung montiert.

Im Rahmen der Schulung wird definiert, dass RTD1 auf die heiße Vorlaufleitung und RTD2 auf die kältere Rücklaufleitung montiert werden soll.

Um die Unterscheidung der Leitungen einfacher zu gestalten, wurde die Vorlaufleitung in Rot dargestellt, dies symbolisiert zum einen die Temperatur und zum anderen, dass hier der Durchflusssensor möglichst nicht verbaut werden soll.

Weiterhin wurde auch hier die Montage vereinfacht und auf das Klebeband verzichtet.

Bei der Montage wird geprüft, ob der richtige Sensor an der gewünschten Leitung montiert wird und ob Wärmeleitpaste aufgetragen wurde.



Abbildung 20: Die Montage des RTD 2 am heißen Vorlauf.

6.5.6 Signalüberprüfung und Nullpunktgleich

Hat der Nutzer alle Schritte korrekt durchgeführt, soll er nun zunächst das Sensorsignal prüfen. Dies wird im Solocue unter dem Menü Diagnose als Graph angezeigt und unten rechts auf dem Dashboard als Signalstärke zusätzlich visualisiert.

Durch die Überprüfung dieser beiden Anzeigen kann der Nutzer ein Bild von der Installationsqualität erhalten.

Zuletzt ist noch ein Nullpunktgleich durchzuführen. Dies dient dazu, Messunsicherheiten durch eine von der Werkskalibrierung abweichende Rohrleitung auszugleichen und mögliche installationsbedingte Laufzeitdifferenzen

auszublenden.

Zunächst muss der Durchfluss gestoppt werden, dies kann durch das Schließen eines Ventils oder das Stoppen der Pumpe erreicht werden. Im Rahmen der Schulung soll die Pumpe gestoppt werden, da dies in der Simulation einfach umzusetzen ist.

Im Anschluss wird dann der Nullpunktgleich über das Konfigurationsprogramm gestartet. Nach Abschluss sollte eine möglichst stabile Null, ohne Schwankungen nach oben oder unten, angezeigt werden. Kleinere Abweichungen könnten über die Schleichmengenunterdrückung ausgeblendet werden. Der Nutzer kann nun den Durchfluss wieder starten und mit dem vierten Modul fortfahren.

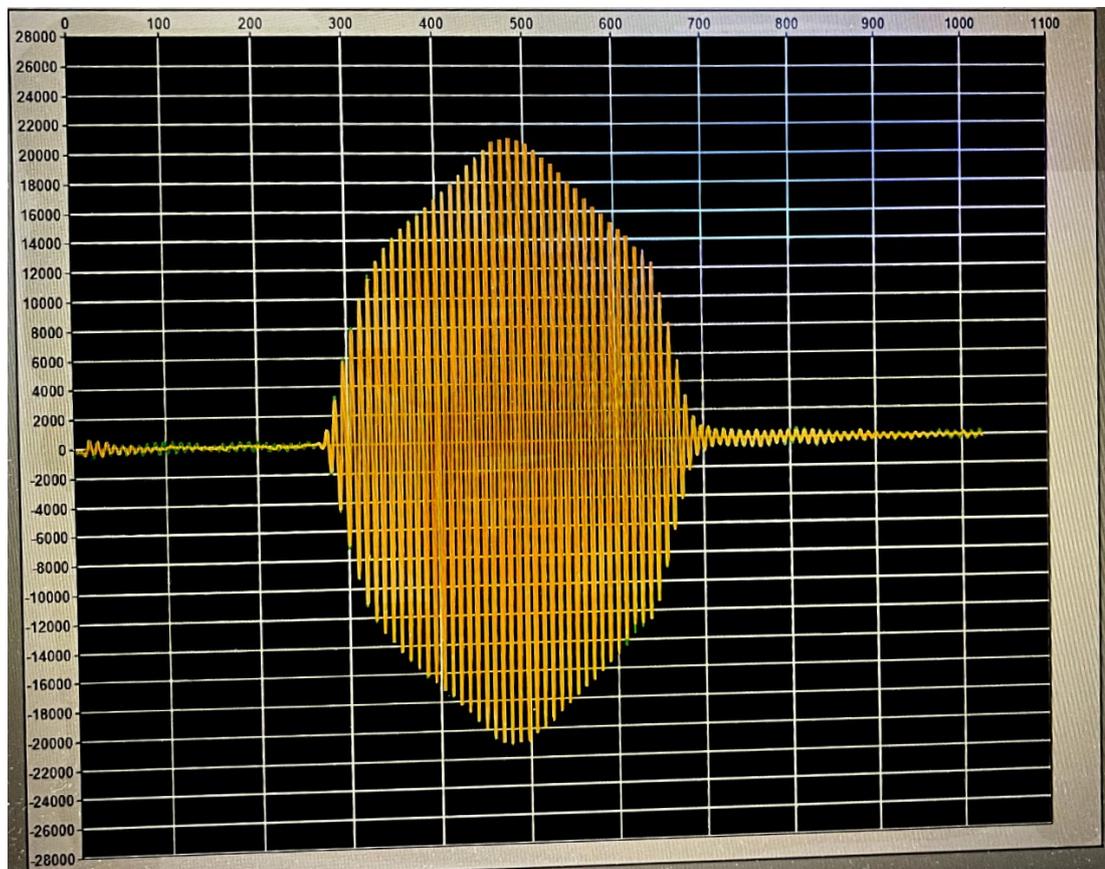


Abbildung 21: Ein gutes Ultraschallsensor Signal.

6.6 4. Modul: Finden von Fehlern in einer Installation

Im letzten VR-Modul lernt der Nutzer die gängigsten Fehler und Hindernisse mit Clamp-On Ultraschall-Energiemessungen kennen.

Dazu ist dieses Modul in fünf zweistufige Stationen aufgeteilt. Jede Station behandelt einen spezifischen Fehler. In der ersten Stufe der Station werden die Ursachen des Fehlers und deren Hintergründe durch ein Video erläutert. Damit der Nutzer nach Abschluss des Videos schnell Informationen finden kann, sind alle Fehlerursachen als Exponat mit einer entsprechenden Beschriftung aufgebaut. Somit kann der Nutzer jederzeit von der Teststation in die Informationsstation wechseln und Informationen sammeln.

In der zweiten Stufe muss der Benutzer in einer Installation einige dieser Fehler finden und beheben. Ob er dies erfolgreich geschafft hat, und welche Fehler noch offen sind, kann er einer Tafel an der Wand entnehmen.



Abbildung 22: Die erste Informationsstation, die Texte an der Wand erklären die Fehler zu den Exponaten. Das Video erklärt die Situationen genauer.

Im Folgenden werden die Stationen kurz Erläutert:

6.6.1 Station 1 - Kein Signal

Signalabbruch lässt die Messung komplett ausfallen und ist somit ein Fehler höchster Priorität.

In dieser Station ist eine Rohrleitung mit offenem Auslauf und Steig-/Falleitung ausgestellt, an dieser Leitung wird erläutert, wo am wahrscheinlichsten Luft-/Gasblasen oder Luftpolster im Rohr entstehen und dass hier von einer Messung abgeraten wird.

Weitere gängige Ausfallursachen wie Rost/Schmutz auf der Rohrleitung, sowie das Fehlen von Koppelpaste zur akustischen Kopplung werden erläutert.

Außerdem kann durch eine falsche Parametrierung oder Verkabelung sowie einen falschen Sensorabstand auch ein Signalausfall entstehen. In der Teststation werden ein paar ausgewählte Fehler zur Behebung eingebaut. So ist der Sensor oben auf einem rostigen Rohr ohne Koppelpaste montiert. Zudem ist der Sensorabstand falsch eingestellt, diesen könnte der Nutzer in Solocue nachlesen.

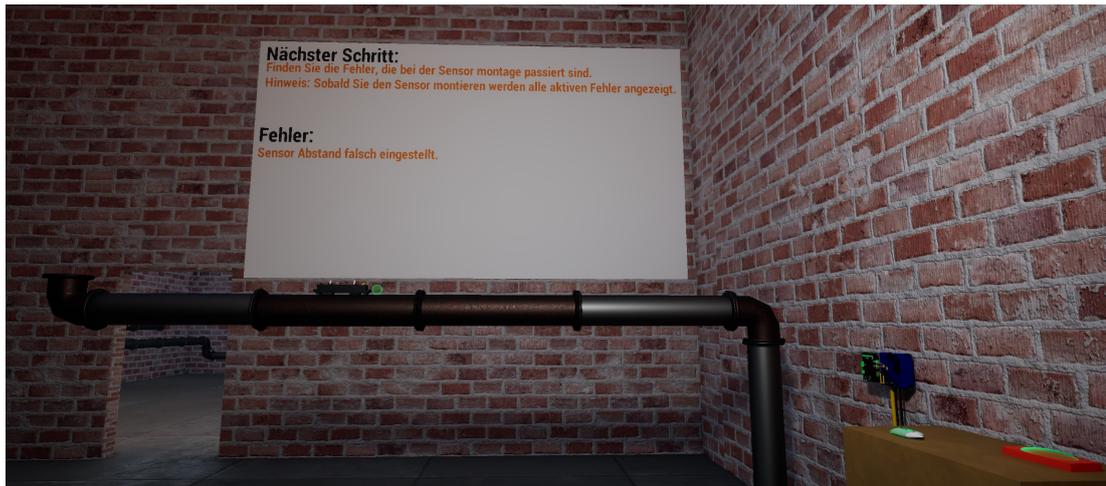


Abbildung 23: Die Teststation 1.

6.6.2 Station 2 - Falsche Temperaturmessung

Im Anschluss wird auf eine inkorrekte Temperaturmessung eingegangen. Fehlmessungen hier können durch Vergessen der Isolation oder Wärmeleitpaste entstehen. Ferner kann auch eine falsche Rohrleitung, etwa eine nahe gelegene Trinkwasserleitung, die nicht zum Heizsystem gehört, gemessen werden.

Auch können die Temperaturmessung betreffenden Einstellungen in Solocue falsch gewählt sein. Beispiele für diese Einstellungen sind der Sensortyp und der Messbereich.

Ergänzend kann die Verkabelung der Temperaturfühler falsch sein, dies kann zu einem Messausfall führen.

Zuletzt kann der Referenzwert, gegen den die Messung verglichen wird, falsch sein. In diesem Fall muss der Referenzwert kontrolliert werden.

In der Teststation wurden Temperaturfühler an einer falschen Leitung platziert und die Wärmeleitpaste entfernt.

Zusätzlich wurden Solocue-Einstellungen manipuliert.

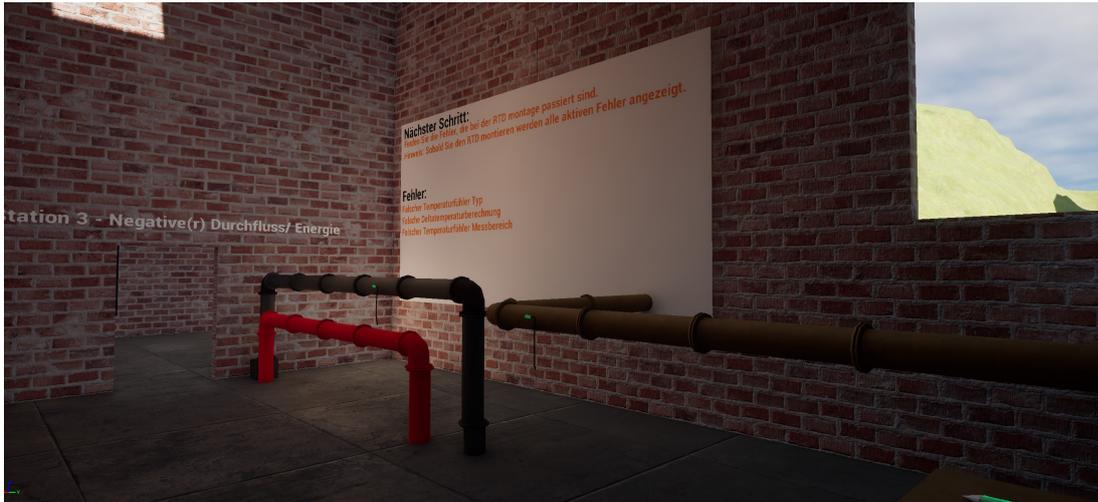


Abbildung 24: Teststation 2 - Falsche Temperaturmessung.

6.6.3 Station 3 - Negative(r) Durchfluss/ Temperatur

Ein negativer Temperatur-/Durchflusswert kann die Messergebnisse erheblich beeinflussen, dieser Fehler ist meist jedoch gut ersichtlich.

Die Gründe hierfür sind übersichtlich. So kann die Verkabelung von den beiden Ultraschallsensoren oder den beiden Temperaturfühlern vertauscht sein, oder diese sind falsch herum montiert. Ebenso gibt es noch die Möglichkeit, die Ausrichtung der Sensoren in der Software falsch angegeben zu haben.



Abbildung 25: Teststation 3 - Negativer Durchfluss und Temperaturwert.

6.6.4 Station 4 - Falscher Durchflusswert

Der Durchflusswert hängt, wie im Kapitel Grundlagen erläutert, von vielen Faktoren ab.

Einige ausgewählte Faktoren werden in dieser Station gezeigt.

Ein wichtiger Faktor ist die korrekte Angabe der Rohr- und Mediumsparameter, daher werden diese auch in der Teststation abgefragt. Überdies kann auch ein schlecht gewählter Montageort oder ein falscher Ultraschallsensorabstand zu Fehlmessungen führen.



Abbildung 26: Teststation 4 - Falscher Durchflusswert. Im Bild ist zusätzlich die rote Markierung bei einer Ultraschallsensormontage, welche zu nah an einer Störquelle ist. Außerdem ist rechts der Knopf zum Pumpen stoppen zu erkennen.

6.6.5 Station 5 - Wissen zur Signalauswertung

Die letzte Station hat als Unterschied zu den vorherigen als einzige keinen Test, da dies nur als Hinweis gedacht ist und teilweise durch andere Stationen bereits abgedeckt wird.

Es wird die Signalauswertung genauer erläutert. Dazu kann in der Software Solocue die Signalamplitude angezeigt werden.

Der Hauptausschlag der Amplitude sollte in der Mitte des angezeigten Graphen liegen. Hier wird zum einen die Signalverschiebung nach links/ rechts oder auch Signalausschläge neben der Hauptamplitude betrachtet.

Bei einer Signalverschiebung kommt das Nutzsignal zu früh oder zu spät an, dies kann mehrere Gründe, wie eine falsche Schallgeschwindigkeit oder Pfad-

6 Beschreibung der einzelnen Module

längen haben, wie im Kapitel Grundlagen erläutert. Ebenso kann auch Luft in der Leitung dieses Signal herbeiführen. Ausschläge außerhalb der Hauptamplitude deuten auf Turbulenzen oder schlechte Rohrleitungszustände hin.



Abbildung 27: Teststation 5 - Signalauswertung.

Kapitel 7 ERSTELLUNG DER SCHULUNG

7.1 Erstellung der Videos

In der Schulung werden an verschiedenen Stellen Videos verwendet. Diesen Abschnitt wird die Erstellung dieser kurz erläutert.

Alle Videos wurden als Bildschirmaufnahme aufgenommen.

Wobei das Video-Modul als Folienpräsentation vorbereitet und aufgezeichnet wurde.

Die Videos, welche die VR-Module zeigen, wurden mithilfe einer Zuschauerkamera in der realen Anwendung aufgenommen. Dies ermöglicht eine stabile Perspektive. In den Videos der VR-Module können durch die Zuschauerkamera die VR-Nutzerhände und Kopf dargestellt werden. Somit kann auch die praktische Bedienung der Gegenstände im Modul gezeigt werden.

7.2 Automatische Berechnung und Anzeige von Verwirbelungen

Da auch Nichtinformatiker Anpassungen an der Schulung durchführen könnten, sollte die Gestaltung der Level möglichst ohne große Programmierkenntnis durchführbar sein.

Die vordefinierten Rohrleitungssegmente sollten in beliebiger Reihenfolge auf der Karte aneinander gereiht werden können, ohne dass der Designer Parameter eingeben muss.

Damit die Verwirbelungen auf die Rohrleitung projiziert werden können, muss zunächst errechnet werden, an welchen Stellen in der Rohrleitung die Strömung verwirbelt ist.

Um dies zu erreichen, werden die einzelnen Rohrleitungssegmente als einzelne Blueprints erstellt. Durch diese Entwurfsvorlagen können die nötigen Informationen, etwa die Nennweite und Länge, im Voraus bei der Entwicklung festgelegt werden. Ein Designer muss diese Vorlagen dann nur in die Szene einfügen und entsprechend hintereinander anordnen. Diese Vorlagen werden in allen VR-Modulen verwendet. Damit alle Rohrsegmente die gleiche Berechnungsgrundlage verwenden, wird diese in einem Mastersegment implementiert und an die einzelnen Elemente vererbt.

7.2.1 Der Auto turbulence detection (ATD) Algorithmus

Um die Verwirbelungen automatisch zu errechnen, muss ein Algorithmus entworfen werden. Dieser Algorithmus prüft jedes einzelne Rohrsegment und markiert die Segmente als *verwirbelt*, die innerhalb der in Abschnitt Anforderungen an den Installationsort genannten Distanzen zu Störkörpern liegen. Dazu gibt jedes Segment an, ob es Verwirbelungen erzeugt und wie weit diese stromauf- und stromabwärts reichen.

Für diesen ATD muss zunächst ein Startpunkt festgelegt werden, dieser könnte etwa eine Pumpe sein. Pumpen werden allerdings vom Hersteller nicht als Störelement genannt, bei anderen Herstellern sind Angaben der einzuhaltenen Abstände unterschiedlich. Deswegen wird dieses Startelement nicht als Pumpe, sondern als unendlich lange gerade Rohrleitung definiert. Dieses unendliche Segment wird als grauer Würfel in der Simulation dargestellt.

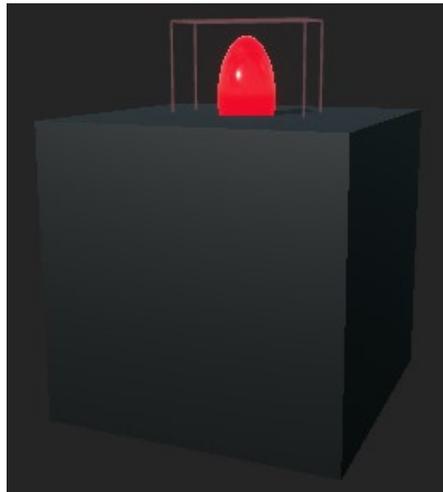


Abbildung 28: Das Durchflusstartelement. In rot ist der Auslass optisch markiert.

Von diesem Startelement aus kann die ATD beginnen. Dazu wird eine rekursive Funktion gestartet, die prüft, ob ein weiteres Rohrsegment am Auslass des Startelements angeschlossen wurde.

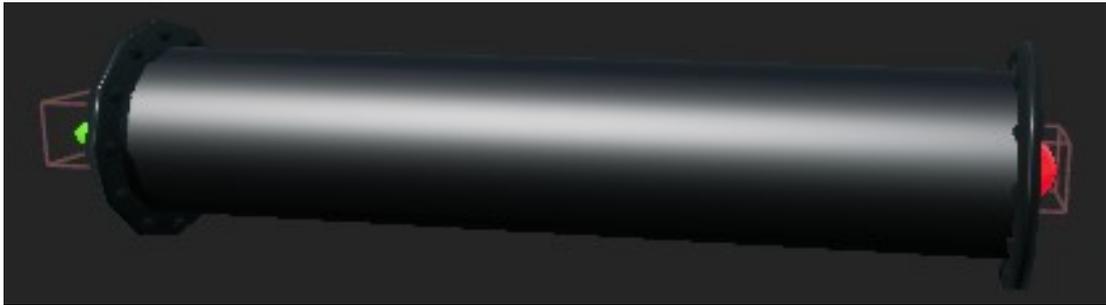


Abbildung 29: Ein gerades Rohrsegment. In Grün ist die Einlassseite und in Rot die Auslassseite markiert.

In der Realität ist egal, in welcher Rotation ein Rohrelement an ein anderes angeschlossen wird, solange die Öffnungen passend verbaut werden. Für die ATD-Berechnung in der Simulation hingegen ist dies relevant. Um die Verwirbelungen in die korrekte Richtung zu berechnen, wird bei dem Rohrsegment ein Ein- und ein Auslass definiert. Der Algorithmus kann prüfen, ob an einem Auslass ein Einlass angeschlossen wurde und somit die ATD-Berechnung an das nächste Segment weiterleiten.

Solange nicht auf einen Störkörper getroffen wird, kann die vorwärts gerichtete Berechnung fortgeführt werden. Da ein Störkörper wie ein Ventil jedoch vor und hinter sich Verwirbelungen erzeugt, kann ab dieser Störquelle nicht mehr nur vorwärts weiter gerechnet werden. Um diese Herausforderung zu lösen, verfügt der ATD zusätzlich über die Option, eine rückwärts gerichtete Rekursion zu starten. Die rückwärts gerichtete Rekursion bekommt eine feste Rekursionstiefe zugewiesen, damit Rechenzeit bei der Ausführung gespart werden kann.

Entsprechend wird die Tiefe auf die Distanz, in welcher vor dem Element Verwirbelungen erzeugt werden, festgelegt.

Nach einer Störquelle müssen die Rohrelemente vor und hinter diesem Element entsprechend prüfen, ob sie innerhalb der Verwirbelungsdistanz des Störelements liegen. Dazu wird eine Nachricht im ATD zwischen den Elementen weitergereicht. Diese Nachricht enthält folgende Informationen:

- Eigenschaften der Störquelle unter anderem die Verwirbelungsdistanz vor und hinter dem Störkörper.
- Die aktuell längste Verwirbelungsdistanz.
- Die Entfernung zum letzten Verwirbelungselement.

Ein Rohrsegment ohne Störquelle nimmt diese Nachricht und erhöht die Distanz zum letzten Störkörper und verringert die längste Verwirbelungsdistanz.

Dazu wird die Länge des Elements durch die Nennweite des Elements geteilt, um einen DN-Faktor zu erhalten. Dieser Faktor kann dann entsprechend addiert und subtrahiert werden. Durch diese Berechnung kann die Verwirbelung auch bei Nennweiten Änderungen korrekt weiter berechnet werden.

Handelt es sich bei dem folgenden Element um einen Störkörper, wird die Nachricht anders verarbeitet.

Es wird hier zuerst überprüft, ob die rückwärts gerichtete Störung des neuen Störkörpers überhaupt berechnet werden muss. Ist der neue Störkörper innerhalb der Verwirbelungsdistanz eines vorherigen Störkörpers, wird überprüft, ob die Distanz zu diesem Störkörper größer ist als die eigene rückwärts gerichtete Verwirbelungsdistanz. In diesem Fall muss keine rückwärtige ATD Nachricht verschickt werden, da alle beeinflussten Elemente bereits verwirbelt sind, andernfalls wird die Berechnung gestartet.

Sollte die Verwirbelungsdistanz der vorherigen Störquelle nicht bis zu der neuen Störquelle reichen, wird diese Prüfung übersprungen und eine rückwärts gerichtete Nachricht verschickt. Die rückwärtige ATD Nachricht kann durch zwei Bedingungen gestoppt werden, zum einen kann das Ende der Verwirbelungsdistanz erreicht werden, zum anderen kann auf ein bereits verwirbeltes Element getroffen werden. Ist die Distanz zwischen diesem verwirbelten Element und der stromaufwärts liegenden Störquelle größer als die verbleibende stromaufwärts gerichtete Verwirbelungsdistanz, kann die Berechnung gestoppt werden.

Bei der stromabwärts gerichteten ATD Nachricht nach einem neuen Störkörper wird zum einen überprüft, ob die neue Störungsdistanz größer ist als die verbleibende Verwirbelungsdistanz eines stromaufwärts liegenden Störkörpers. Ist diese Distanz kleiner, so muss in der ATD Nachricht die maximale Länge nicht verändert werden, es muss der neue Störkörper als Ursache hinterlegt und die Distanz zum letzten Störelement auf null gesetzt werden.

Die stromabwärts gerichtete ATD-Berechnung wird so lange fortgesetzt, bis kein Rohrelement mehr am Auslass des aktuellen Elements angeschlossen ist.

7.2.2 Sonderfälle in der ATD-Berechnung - Rohrbögen

Bei der vorwärts gerichteten Berechnung gibt es zwei Sonderfälle. Wenn auf einen Rohrbogen direkt ein zweiter Rohrbogen folgt, muss die Stromabwärts gerichtete Verwirbelungsdistanz von $10 \times DN$ auf 14 oder $24 \times DN$ angepasst werden. Im Falle eines Rohrbogens wird zunächst überprüft, ob die Distanz zum letzten Störkörper null ist. Sollte dies zutreffen, kann überprüft werden,

ob es sich bei dem voran gegangenen Element ebenfalls um einen Rohrbogen handelt. Bei zwei aufeinanderfolgenden Rohrbögen hängt die kombinierte Verwirbelungsdistanz von der Ausrichtung der Bögen zueinander ab. Bilden die beiden Bögen ein *U* oder *S*, auch *2D-Bogen* genannt, so wird die Distanz $14 \times DN$ angewendet, bilden die Rohrbögen ein verdrehtes *Z*, auch *3D-Bogen* genannt, so muss die Distanz auf $24 \times DN$ erhöht werden. (Siehe Bild 30)



Abbildung 30: Links ein Doppel-Bogen mit drei Ebenen (3D-Bogen) und rechts ein Doppel-Bogen über zwei Ebenen (2-D-Bogen)

Für die Identifizierung der Anordnung muss das Verhältnis zwischen den Rotationen der Objekte im Raum berechnet werden. Bei einem 2D-Bogen kann nur auf einer oder allen drei Achsen eine Rotation von 90° oder 270° entstehen, da die Krümmung der Rohrleitung sonst auf eine dritte Achse geführt wird. Zusätzlich kann das Objekt auf den anderen Achsen um 180° gedreht werden, dies entspricht einer Spiegelung und kann einen *U-Bogen* zu einem *S-Bogen* wandeln. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass im Rahmen des ATD ein Ein- und Auslass definiert wurden, daher sind die Rotationen auf entsprechende Werte beschränkt, bei denen zwei Elemente passend verbunden wurden.

Für einen 3D-Bogen muss ein Versatz von $90/270^\circ$ auf genau zwei Achsen anliegen, zusätzlich kann hier eine Achse um 180° verdreht werden.

Der Versatz kann über normalisierten Eulerwinkel berechnet werden. Zunächst wird die *X*, *Y* und *Z* Rotation durch eine Modulo-Rechnung auf einen Bereich von $0-360$ abgebildet, in Unreal Engine kann der Benutzer auch negative Rotationsangaben machen oder die Zahl 360° übersteigen. Um das Rotationsverhältnis zu errechnen, werden dann die normalisierten Werte pro Achse subtrahiert $X - X'$, $Y - Y'$, $Z - Z'$. Diese Ergebnisse können dann entsprechend den oben genannten Anordnungen kontrolliert werden.

7.2.3 Anzeige der berechneten Verwirbelungen

Ist die Berechnung abgeschlossen, kann die Verwirbelung in den Elementen dargestellt werden. Dazu wird das eingeführte Rot, Grün Schema verwendet. Es wird eine Rekursion vom Rohrstartelement aus begonnen, diese breitet sich nur stromabwärts aus. Jedes erreichte Rohrelement prüft, ob durch den ATD-Algorithmus hinterlegt wurde, dass das Element verwirbelt ist. Entsprechend wird dann die Erscheinung durch einen Wechsel des Oberflächenmaterials angepasst.

Zum Zurücksetzen der Anzeige wird dieselbe Vorgehensweise verwendet, jedoch wird das Oberflächenmaterial auf Stahl gesetzt.

7.2.4 Start des ATD

Die ATD-Berechnung kann auf drei Arten gestartet werden. Zum einen kann eine „Funkverbindung“ zu einem Auslöseknopf hergestellt werden. Für diese Funktion kann in dem Auslöseknopf und im Rohrstartelement ein Kanal hinterlegt werden.

Überdies kann auch im Rohrstartsegment eingestellt werden, dass es bei Anwendungsstart die Verwirbelungen berechnet. In der für die Meta Quest 3 optimierten Version hat diese Vorgehensweise allerdings zu Fehlfunktionen geführt, daher wurde eine dritte Methode hinterlegt. Hierzu kann eine unsichtbare Box in der Szene platziert werden, sobald der Spieler diese betritt, wird die ATD-Berechnung gestartet. Auch hier erfolgt die Kommunikation über den „Funkkanal“. Dies ist für die Elemente in Modul 2,3 und 4 notwendig, da hier kein Auslöseknopf zuvor gedrückt werden muss.

Einzig der Auslöseknopf startet zusätzlich die Anzeige der Verwirbelungen. In Modul zwei wird dies durch den Laserpointer oder den Auflösungsknopf und in Modul drei/vier durch die Montage des Ultraschallsensors ausgelöst. Da ein Knopfdruck auch die ATD-Berechnung auslöst, wird diese Berechnung, um die Rechenzeit zu optimieren, lediglich beim ersten Knopfdruck durchgeführt.

7.3 Entwicklung der 3D Modelle

Da die in der Schulung benötigten 3D-Modelle keine Standardmodelle sind, wie sie in Vielzahl im Internet zur Verfügung stehen, mussten diese selbst erstellt werden. Dazu wurde die 3D-Modelling-Software Blender benutzt.

Für die Schulung wurden folgende 3D-Modelle entwickelt.

- Diverse Rohrleitungen (Geradeleitung, Rohrbogen, Ventil, T-Stück, Kaliberwechsel, Flansch - In verschiedenen Nennweiten)
- Laserpointer
- Messschieber

- Wandstärkenmessgerät
- TFX-5000 Energy Messumformer inkl. Ultraschallsensor und Temperaturfühler Kabelenden sowie Brücken
- TFX-5000 DTTR Sensorschiene inkl. Sensoren
- Temperaturfühler mit Kabel
- Schraubendreher
- Schleifpapier/Klotz
- Koppel/Wärmeleitpasten Tube
- Knopf
- USB-Kabel
- Ferritkern

Weiterhin wurden frei verfügbare 3D-Modelle und Texturen sowie Materialien aus Unreal-Engine verwendet.

7.4 Komplexere Objekte

Mithilfe dieser 3D-Modelle wurden einige Objekte und Komponenten erstellt. Im folgenden Abschnitt werden die komplexeren Objekte beschrieben.

7.4.1 Levelmanager

Damit in Modul drei und vier die Anzeige des Installationsfortschritts und eine Überwachung der Installationsfehler möglich ist, wird ein Levelmanager eingeführt.

Dies ist ein pro Modul oder Station einzigartiges Blueprint welches die Daten von allen Komponenten sammelt und überwacht. Pro Station wird eine Kindinstanz des Masterblueprints angefertigt, sodass es die passenden Arbeitsschritte und Fehler anzeigen kann.

Zusätzlich wurden dafür zwei *Structs* eingeführt, im ersten Struct wurden alle Aufgaben hinterlegt, welche für eine korrekte Installation notwendig sind, und im zweiten Struct wurden alle machbaren Fehler hinterlegt. Diese Fehler sind eine Sammlung von Booleschen Variablen, die entsprechend überprüft werden können, sodass etwa alle als wahr hinterlegten Fehler angezeigt werden können.

Der Manager hat eine Schnittstelle, sodass die einzelnen Komponenten die aktuelle Version des Structs einsehen und verändern können. Hat eine Komponente eine Aktualisierung vorgenommen, werden die Structs erneut geprüft. Die Fehler werden in einem mehrzeiligen String zur Anzeige über ein Textobjekt hinterlegt. Zuletzt wird überprüft, ob der nächste Schritt angezeigt werden muss.

Damit die Objekte den für das Modul passenden Levelmanager identifizieren können, wird ein „Funkkanal“ hinterlegt.

Dadurch kann der Nutzer in Echtzeit sehen, was er als Nächstes erledigen

Struct: Ein Datentyp, in dem ein Objekt durch Eigenschaften definiert werden kann. Bspw. Baum: Enum: Art, Double: Höhe, Integer: Alter... diese Art der Definition erleichtert es, mehrere ähnliche Objekte zu verwalten und in Algorithmen zu verwenden.

muss, oder auch welche Fehler er gemacht hat.

Passend zum nächsten Schritt startet und stoppt der Manager das entsprechende Schulungsvideo im dritten Modul.

7.4.2 SoloCue

Ein weiterer Baustein ist die Repräsentation der Herstellersoftware Solocue. Um eine möglichst gut benutzbare Oberfläche zu generieren, wird diese Software nicht auf einem kleinen Computerbildschirm dargestellt, sondern an die Wand projiziert.

Damit der Nutzer die Software kennenlernen kann, werden die für eine Inbetriebnahme wichtigsten Ansichten nachgebaut. Hierbei wird in den meisten Fällen keine tiefere Funktion hinterlegt, es wird lediglich geprüft, ob der Nutzer die im Video erklärten Einstellungen korrekt ausgewählt hat.

Tatsächliche Funktionalität wird hingegen bei der Sensorabstandsbrechung hinterlegt. Diese Berechnung unterscheidet sich von der, in der originalen Software, da diese nicht öffentlich einsehbar ist und keine entsprechende Formel bei Recherchen gefunden wurde.

Um den Abstand zu erhalten, wurde durch Trigonometrie in Kombination mit dem Snelliusschen Brechungsgesetz eine Formel hergeleitet.

Bei der Berechnung wurden zwei Annahmen getätigt, es wurde vermutet, dass der Schall in einem Winkel von $\alpha = 20$ emittiert und im Sensor ein Material mit einer Schallgeschwindigkeit von 1.140 m/s verwendet wird.

Durch das Gesetz von Snell lässt sich nun der Eintrittswinkel in das Rohr berechnen: $\alpha_1 = \arcsin \frac{v_{Pipe}}{v_{Transducer}} * \sin \alpha$

Nach Pythagoras kann in diesem Segment der entsprechende Sensorabstand durch folgende Formel errechnet werden: $S_1 = \frac{W}{\tan \alpha_1}$, da der Sensorabstand der An Kathete entspricht. Dabei steht W für die bekannte Wandstärke der Rohrleitung.

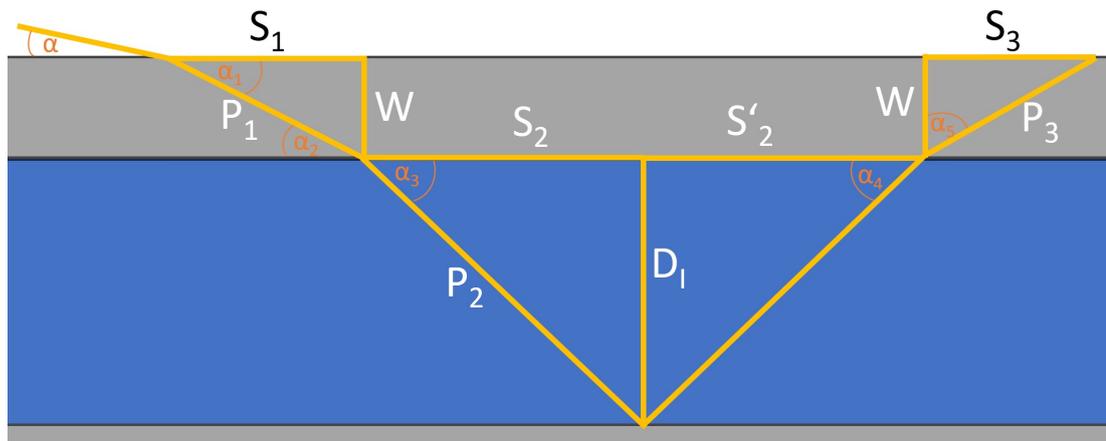


Abbildung 31: Skizze zur Berechnung des Sensorabstands.

Die Rechnung wird dann für das Medium wiederholt, hierbei wird die W durch den Innendurchmesser D_I ersetzt und die Schallgeschwindigkeiten entsprechend $\frac{v_{\text{Medium}}}{v_{\text{Pipe}}}$. Es gilt $\alpha_1 = \alpha_2$, daher kann die oben erläuterte Formell verwendet werden. Bei einem V-Schuss entspricht die Distanz S_2 dem halben Sensorabstand für den inneren Rohrbereich.

Um die letzte Brechung im Übergang zur Rohrwand zu berechnen, kann ein Grundsatz der Spiegelung angewandt werden: *Einfallswinkel = Reflexionswinkel*, dadurch ergibt sich $\alpha_3 = \alpha_4$. Entsprechend dem bisherigen Vorgehen kann nun der S_3 berechnet werden.

Als gesamter Sensorabstand ergibt sich bei einem V-Schuss $S_{\text{Gesamt}} = 2 * S_2 + S_1 + S_3$. Sollte der Nutzer einen W-Schuss verwenden sollen, wird $4 * S_2$ berechnet, da der Schall vier Pfade im Rohr zurücklegt. Bei einem Z-Schuss hingegen wird nur $1 * S_2$ berechnet.

Die Durchfluss- und Energiewerte werden anhand der im Kapitel Grundlagen erläuterten Formeln berechnet. Für die Berechnung gibt der Levelmanager eine Fließgeschwindigkeit sowie zwei Temperaturen vor. Die vom Nutzer angegebenen Parameter fließen ebenfalls in die Berechnung ein. Im Dashboard werden die errechneten Werte entsprechend der ausgewählten Einheiten umgerechnet und angezeigt. Das im Diagnose-Menü zu erkennende Signalbild wird entsprechend dem Installationszustand vom Levelmanager festgelegt.

Zusätzlich ist es möglich, vorausgewählte Einstellungen für die Software zu hinterlegen, sodass in Modul vier eine Fehlersuche möglich ist.

7.4.3 Messwertumformer

Der Messwertumformer verfügt über mehrere Funktionen. Damit der Nutzer diese nutzen kann, muss zunächst das Gehäuse geöffnet werden. Dazu werden vier Schrauben mithilfe des Schraubendrehers gelöst, im Anschluss öffnet sich die Frontseite automatisch.

Im Inneren sind zwölf Kabelenden zu erkennen, welche vom Nutzer angefasst und zur farblich passenden Klemme bewegt werden können. Durch den Schraubendreher können diese befestigt werden. Dabei wird überprüft, ob die Kabelenden an der korrekten Position sind. Sind alle Kabel montiert, wird der Levelmanager informiert.

Jedes Kabelende ist ein starres Objekt, welches mit einem Gelenk am Ultraschallsensor oder Temperaturfühler Kabel montiert ist. Die Brücken sind zur einfachen Montage mit einer unsichtbaren Feder schwebend vor dem Gehäuse montiert, sodass der Nutzer diese nicht suchen, sondern nur greifen und in die Klemme drücken muss.

Zusätzlich ist es möglich, ein USB-Kabel am Messwertumformer und einen Ferritkern am Ultraschallsensorkabel zu montieren, auch hier wird der Levelmanager informiert.



Abbildung 32: Der TFX-5000 Messwertumformer, links die geschlossene Front, rechts offen. Mit montierten Kabelenden und Brücken.

7.4.4 Messwertaufnehmer

Der Messwertaufnehmer (Ultraschallsensoren) ist noch umfangreicher gestaltet. Eine Funktion ist das Auftragen von Koppelpaste auf die Sensorflächen, hierzu wird ein weißer Zylinder entsprechend ein- oder ausgeblendet. Zum Auftragen wird das Koppelpastenobjekt 7.5.6 verwendet.

Ebenso kann der Sensorabstand eingestellt werden, dazu kann der Nutzer einen der beiden Sensorköpfe greifen und durch die Interaktionstaste die Feststellmutter lösen. Der Sensorkopf folgt nun der Hand und der Abstand wird

wie bei dem Messschieber in Echtzeit berechnet und angezeigt. Dabei richtet sich der Text zur Kamera des Nutzers aus. Um sicherzustellen, dass der richtige Abstand eingestellt ist, wird dieser bei der verknüpften Solocueinstanz abgefragt und verglichen. Da die korrekte Einstellung schwierig ist, hat der Nutzer eine Toleranz von 2,5 % auf den berechneten Abstand.

Abschließend kann der Sensor an der Rohrleitung montiert werden, dazu wird die Physiksimulation deaktiviert. Dadurch bleibt der Ultraschallsensor an der aktuellen Position schweben und bewegt sich nicht mehr.

Bei der Montage prüft der Sensor, ob der Rostfaktor im berührten Segment nahe null liegt und ob das Segment zu nahe an einer Störquelle liegt. Der Ultraschallsensor berechnet seine relative Position zum Rohr, um sicherzustellen, dass er bei einem horizontalen Rohrverlauf an der Seite des Rohres montiert wird, bei einem vertikalen Verlauf wird diese Prüfung übersprungen.

Für diese Positionsberechnung verwendet der Sensor die Weltkoordinaten der Ein-/Auslaufmarkierungen des Rohres, anhand dieser kann bestimmt werden, welche Ausrichtung das Rohr hat, da dieses entweder entlang der X-, Y- oder Z-Achse ausgerichtet sein kann. Entsprechend der Ausrichtung wird dann der relative Winkel zwischen Ultraschallsensor und Rohrsegment berechnet. Ist dieser Winkel zwischen $60-120^\circ$ oder $240-270^\circ$, ist der Sensor an der linken oder rechten Rohrseite montiert und es wird kein Fehler ausgelöst. Zusätzlich wird nach der Ausrichtung auch kontrolliert, ob der Up- oder Downstreamsensor näher am Rohreinlass ist. Sollte der Downstreamsensor näher sein, ist der Sensor falsch herum montiert und es wird ein Fehler ausgelöst.

Am Sensor befinden sich zwei Kabelenden, diese sind in der Realität bis zum Messwertempfänger durchgängig und damit wird der Bewegungsradius des Sensors eingeschränkt. Da die Kabel über ein Skeletal Mesh dargestellt werden, sind mehrere Meter Kabel teuer in der Berechnung. Durch das Skeletal Mesh entsteht eine große Unsicherheit gegenüber Fehlern in der Physikberechnung. Daher wurden diese in der Simulation bei allen kabelgebundenen Sensoren nur angedeutet und nicht vollständig verbunden.



Abbildung 33: Der DTTR-Sensor, im Bild vorne die Unterseite mit Koppelpaste, hinten die Seitenansicht.

7.4.5 Temperaturfühler

Die Temperaturfühler sind etwas einfacher gestaltet, auch hier wurde auf das Verbindungskabel verzichtet. Auf die Temperaturfühler kann Wärmeleitpaste aufgetragen werden. Zur Montage werden die Temperaturfühler wie der Ultraschallsensor an das Rohr gehalten und beenden dann ihre Physiksimulation. Es wird überprüft, ob vorher Wärmeleitpaste aufgetragen und die entsprechend in der Software hinterlegte Rohrleitungszuordnung eingehalten wurde. Auf dem Kabel ist eine Markierung mit der Nummerierung der beiden Temperaturfühler, RTD 1 und RTD 2.

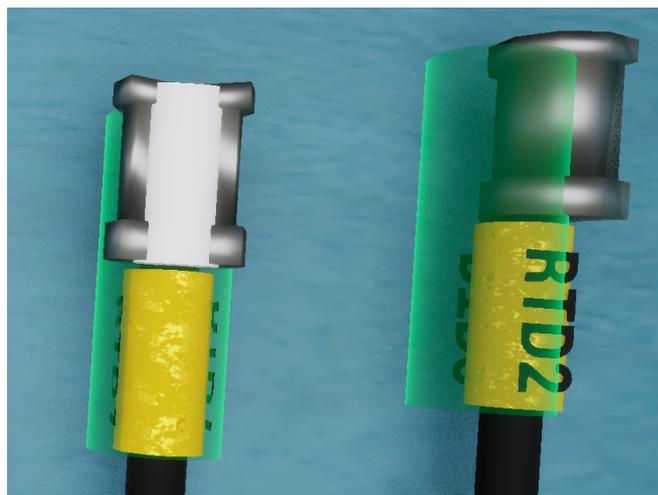


Abbildung 34: Die Temperaturfühler, links mit Wärmeleitpaste.

7.4.6 Videobildschirme

Für die Videoanleitungen wird ebenfalls eine Entwurfsvorlage erstellt. Diese Vorlage besteht aus einer Leinwand und einem Kontrollbereich. Der Kontrollbereich ist eine unsichtbare Box. Befindet sich der Nutzer innerhalb dieser Box, wird das Video gestartet. Sobald der Nutzer diesen Bereich verlässt, wird das Video gestoppt.

Zur einfachen Austauschbarkeit können die Videodateien über die Optionen der Objekte in der Szenenansicht gewechselt werden.

Weiterhin kann festgelegt werden, dass ein Video bei Anwendungsbeginn automatisch startet.

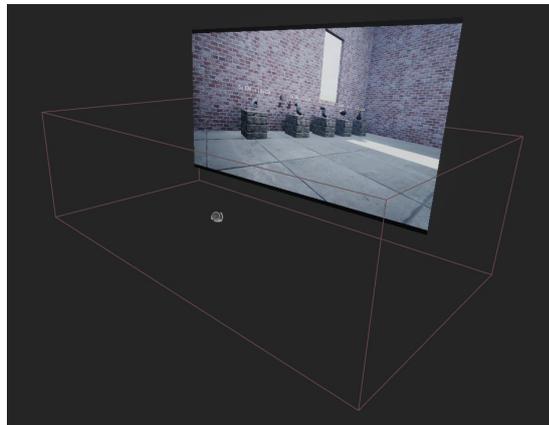


Abbildung 35: Das Videoplayer Objekt.

7.5 Einfache Objekte

In der Anwendung existieren einige sehr einfach integrierte Objekte, diese werden kurz in ihrer Funktionsweise vorgestellt.

Viele dieser Objekte bestehen aus zwei Kernelementen. Das auffälligste und unterschiedlichste Element ist das 3D-Mesh, dieses bestimmt das Aussehen der Komponente.

Weiterhin haben diese Objekte einen greifbaren Bereich, auch dieser ist identisch. Dieser Bereich besteht aus einer Kugel oder einem Zylinder, welcher durch seine grüne Farbe dem Nutzer symbolisieren soll, dass dieses Objekt greifbar ist.

Zusätzlich ist eine Logik hinterlegt, welche prüft, ob der Nutzer eine seiner Hände im nahen Umkreis hat und ob er das Objekt versucht zu greifen. Wenn der Nutzer ein Objekt greift, werden weitere ressourcenintensive Funktionen aktiviert. Beim Ablegen des Objekts werden diese wieder deaktiviert.

Dabei wird etwa überprüft, ob dieses Objekt ein bestimmtes anderes Objekt

berührt, oder ob der Nutzer eine Interaktionstaste betätigt. Durch diese Kontrollen ist es möglich, dass das USB-Kabel erkennt, wenn der Nutzer es an den USB-Anschluss hält, oder wenn der Nutzer mit dem Schraubendreher eine Schraube oder Klemme berührt, sodass die Vibrationsfunktion ausgelöst wird.

Es folgt nun eine Auflistung und kurze Beschreibung der spezifischen Komponenten:

7.5.1 Druckknöpfe

Eine der ersten Komponenten, welche der Nutzer verwendet, ist der Druckknopf.

Anders als die meisten Komponenten kann dieser nicht in die Hand genommen werden, er überprüft jedoch, ob der Nutzer die Hand auf den Knopf drückt.

Kommt es zu einer Berührung mit der Oberseite, so verändert der Taster seine Position nach unten so lange, bis die Berührung durch die Bewegung verhindert oder die minimale Position erreicht wurde.

In der minimalen Position löst der Taster dann eine hinterlegte Aktion aus, so etwa das Auslösen der Verwirbelungsberechnung oder das Laden des nächsten Rohrleitungssegments in Modul zwei.

Dazu wird der Knopf entsprechend der gewünschten Funktion angepasst oder ein Kommunikationskanal in der Szene hinterlegt.

Die Knöpfe spielen ein Geräusch ab, wenn sie erfolgreich betätigt wurden, und lösen eine Vibration aus.

In der Schulung wurden vier verschiedene Knöpfe erstellt:

- Anzeige und berechnen der Verwirbelung.
- Auflösung der in Modul zwei noch nicht ausgewählten Elemente.
- Wechsel des in Modul zwei gezeigten Rohrabschnitts.
- Pumpensteuerung, um in Solocue einen Nullpunktgleich durchzuführen.

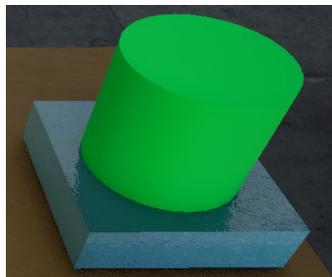


Abbildung 36: Ein Druckknopf.

7.5.2 Laserpointer

Anders als der Druckknopf kann der Laserpointer vom Nutzer in die Hand genommen werden.

Der Nutzer aktiviert den Laserstrahl, sobald die Komponente in der Hand ist. Dieser Strahl wird durch ein Partikelsystem erzeugt und überprüft, ob er mit einer Rohrleitung kollidiert. Zusätzlich wird geprüft, ob die Interaktionstaste gedrückt wurde, dann wird wie im 2. Modul: Vertiefung der Distanzen beschrieben eine Aktion durchgeführt.



Abbildung 37: Der Laserpointer.

7.5.3 Wandstärkenmessgerät

Eines der einfacheren Objekte ist das Wandstärkenmessgerät. Dieses prüft, ob ein Rohrsegment berührt wird, ruft die im Segment hinterlegte Wandstärke ab und zeigt sie als Textobjekt an.



Abbildung 38: Das Wandstärkenmessgerät.

7.5.4 Messschieber

Etwas mehr Funktion ist im Messschieber hinterlegt. Drückt und hält der Nutzer eine Interaktionstaste, wird der untere Balken des Messschiebers nach oben bewegt, bis er eine Kollision mit einem anderen Objekt oder dem oberen Balken registriert. Gleichzeitig wird der Abstand zwischen den Balken über das 3D-Koordinatensystem bestimmt. Hierbei muss beachtet werden, dass zur Berechnung nicht nur der Abstand auf der Z-Achse verwendet werden kann, da der Nutzer das Objekt in der Hand rotieren kann, daher muss hier eine 3D-Vektor-Distanzfunktion verwendet werden.

Da die korrekte Anwendung des Schiebers in der Simulation schwer sein kann, wird der Messwert korrigiert, sobald der untere Balken ein Rohrsegment berührt. Hier wird dann der im Segment hinterlegte Durchmesser als Distanz angezeigt. Ohne diese Hilfe passieren dem Nutzer schnell große Messfehler, da der Messschieber schräg oder zu hoch gehalten wird.



Abbildung 39: Der Messschieber.

7.5.5 Schraubendreher

Der Schraubendreher erlaubt es dem Nutzer, das TFX-5000 Gehäuse zu öffnen und Kabel in den Klemmen zu befestigen. Wenn der Nutzer die Komponente in der Hand hält, werden zwei Überprüfungszyklen durchgeführt.

Zuerst wird überprüft, ob der Schraubendreher eine Schraube oder Klemme berührt, danach, ob eine Interaktionstaste betätigt wird. Bei dem Tastendruck

informiert das Objekt „Schraubendreher“ das entsprechende Objekt, dass es eine Aktion durchführen muss.

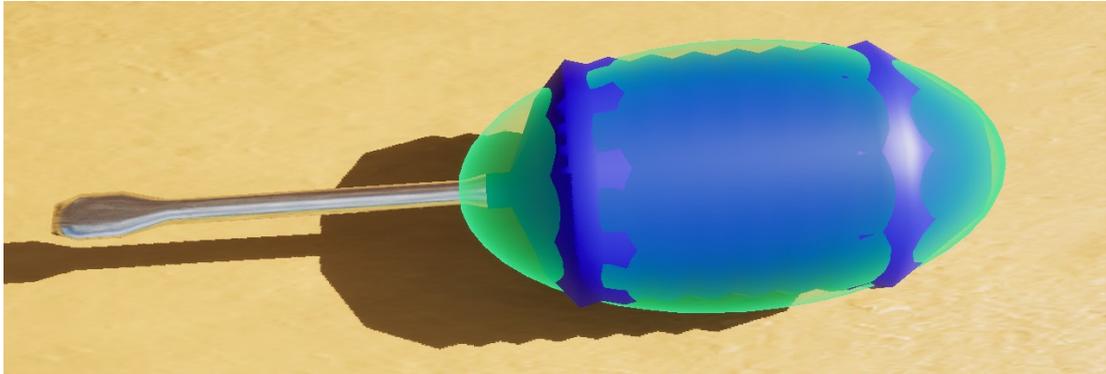


Abbildung 40: Der Schraubendreher.

7.5.6 Wärmeleit- und Koppelpaste

Die Wärmeleitpaste und die Koppelpaste sind nahezu identische Objekte. Sie unterscheiden sich in der Anwendbarkeit, so kann Wärmeleitpaste auf die Temperaturfühler und Koppelpaste auf die Ultraschallsensoren aufgetragen werden. Dabei prüft das Objekt, ob ein entsprechender Gegenpart die Spitze der Tube berührt, kann die Paste aufgetragen werden.



Abbildung 41: Die Ultraschallkoppelpaste (links) und die Wärmeleitpaste (rechts).

7.5.7 Schleifpapierblock

Der Schleifpapierblock kann Korrosion an der Außenseite eines Rohres entfernen. Für diesen Zweck kommuniziert das Schleifpapier mit dem berührten Rohr und verändert die Texturkombination. Es werden zwei Texturen vermischt, eine die Stahltextur, eine weitere ein Korrosionsmuster als obenliegende Maske über der ersten. Bei dem Schleifprozess wird das Mischungsverhält-

nis so lange verschoben, bis die Korrosionstextur nicht mehr sichtbar ist. Während des Prozesses wird ein Schleifgeräusch abgespielt.

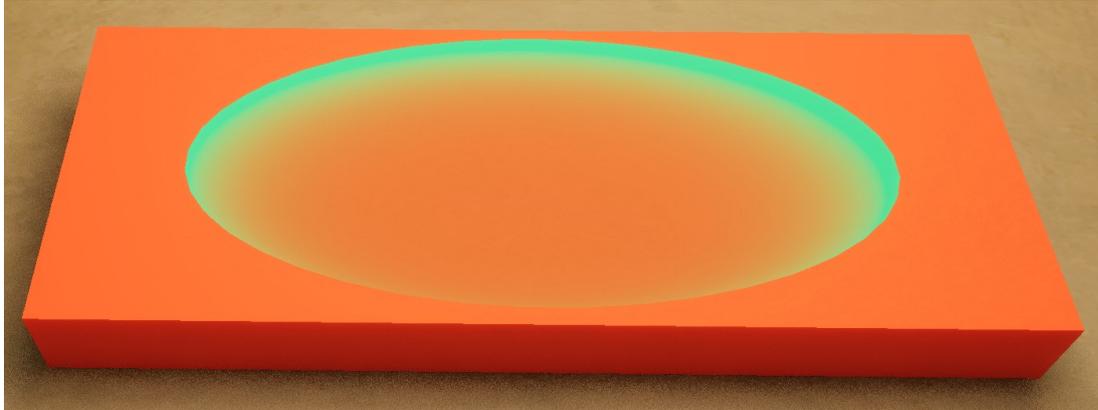


Abbildung 42: Der Schleifpapierblock.

7.5.8 USB-Kabel

Das USB-Kabel kann an den USB-Anschluss des Messwertumformers montiert werden. Der Anschluss erfolgt ähnlich zur Realität durch Drücken des Kabels in die Anschlussbox am Gerät.



Abbildung 43: Das USB-Kabel, links am Messwertumformer montiert, rechts einzeln.

7.5.9 Ferritkern

Der Ferritkern kann am Ultraschallsensorkabel unterhalb des Messwertumformers montiert werden. Damit der Ferritkern nicht verrutscht, soll das Kabel

einmal um den Kern geführt werden. In der Simulation werden dafür weitere Objekte bei der Montage eingeblendet.

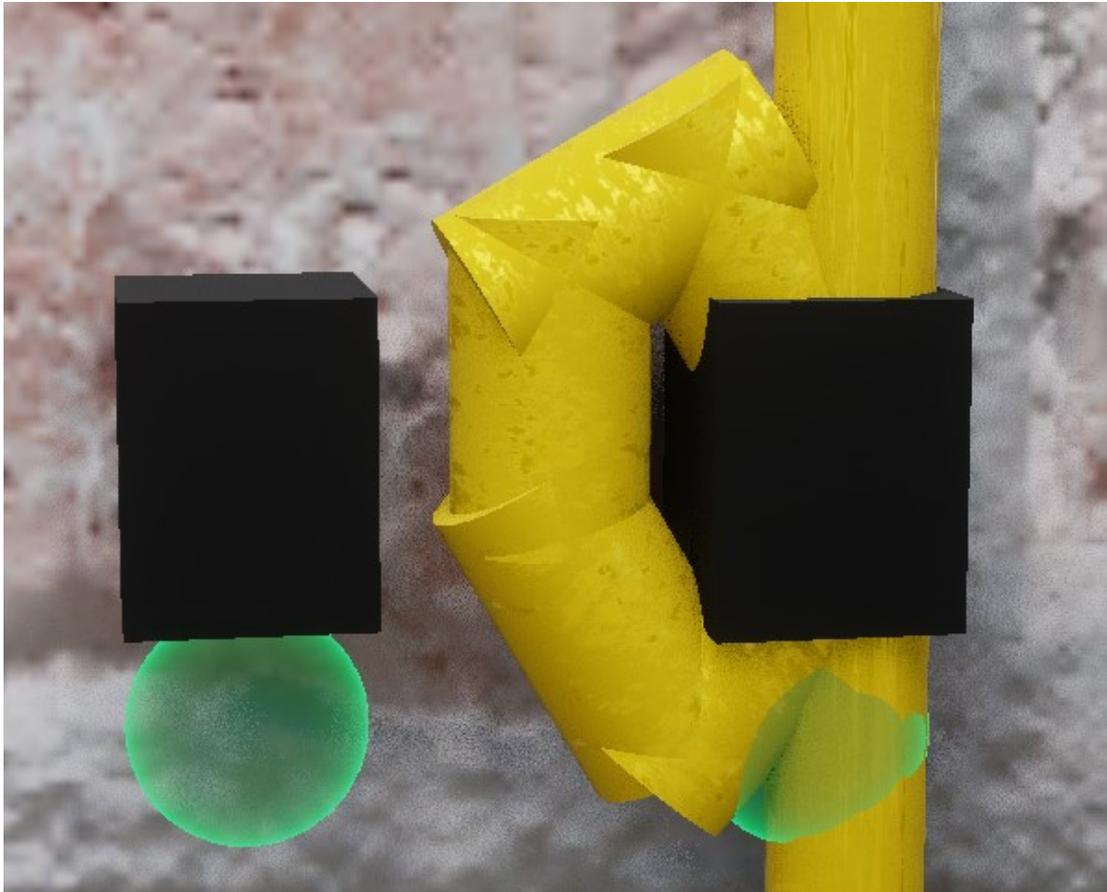


Abbildung 44: Der Ferritkern, links nicht montiert, rechts am Ultraschallsensorkabel montiert.

Kapitel 8 PRAKTISCHER TEIL - ROHR-SYSTEM

Im Rahmen der Evaluation werden die Teilnehmer an einem realen Rohrsystem ein Clamp-On Ultraschall Energiemessgerät in Betrieb nehmen. Um dies möglichst flexibel durchzuführen, wird ein mobiler Prüfstand gebaut.

8.1 Planung des Rohrsystems

Zunächst werden die Anforderungen an das Rohrsystem erläutert.

8.1.1 Rohrnennweite und Material

Damit das System möglichst flexibel einsetzbar ist, soll es möglichst leicht und kompakt erstellt werden.

Dabei spielt die Rohrleitungs-nennweite eine entscheidende Rolle, bei einer Nennweite kleiner DN 50 kann der Sensor, welcher in der Schulung verwendet wurde, nicht installiert werden.

Bei Nennweiten größer DN50 werden allerdings die Ein- und Auslaufstrecken sehr lang. Bei DN50 ist die längste in der Anleitung genannte Störquelle ein 3D-Bogen oder ein Ventil, hier müssen $24 \times DN$ also 1,2 Meter Abstand gehalten werden.

Dazu kommen noch die Auslaufstrecke von $5 \times DN$ also 25 cm vor dem nächsten Bogen. Wenn noch ca. 30 cm für eine Sensorplatzierung geplant werden, muss die Rohrleitung nach einem solchen Bogen mindestens 1,75 m lang sein. Sollte das Ganze in DN 75 geplant werden, muss ca. 2,45 m geplant werden.

Damit das System noch gut transportiert werden kann und auch nicht zu viel Platz in Anspruch nimmt, wird eine DN 50-Leitung verwendet.

Weiterhin muss ein Material gewählt werden.

Im Rohrleitungsbau sind übliche Materialien:

- Stahl
- Edelstahl
- Kupfer
- Kunststoff (PE, PVC, PP)

Metallrohrleitungen wie Kupfer oder Stahl sind zwar sehr robust, allerdings auch recht schwer im Vergleich zu Kunststoff und aufwendig in der Verarbeitung.

Weiterhin hat Kunststoff noch den Vorteil, dass hier keine Korrosion entstehen

kann.

Da die Rohrleitungen im System eine maximale Länge von zwei Metern haben, sollten für das Testsystem Kunststoffrohre ausreichend Stabilität bieten. Überdies können die Rohrleitungen mithilfe von Rohrschellen in kurzen Abständen befestigt werden.

Aus diesen Gründen wird ein Kunststoffrohr, genauer ein PE-Rohr, verwendet.

PE gegenüber PVC und PP wird aufgrund der Verfügbarkeit und der einfachen Verarbeitung verwendet.

8.1.2 Bau eines Gestells

Da die Rohrleitung nicht freischwebend verbaut werden kann, muss ein Rahmen erstellt werden.

Auch hier gilt es, ein möglichst geringes Gewicht, bei guter Stabilität zu erreichen.

Hier ergeben sich folgende Möglichkeiten:

- Holzrahmen
- Stahlrahmen
- Aluprofile
- Siebdruckplatte

Der Stahlrahmen ist zu schwer und muss aufwendig verschweißt werden, so dass hier der Rahmen bei Produktion direkt korrekt für die Rohrleitungen sitzen muss. Um die Rohrleitung zu befestigen, müssen Löcher in den Stahl gebohrt und ein Gewinde geschnitten werden, daher wird dieser nicht verwendet. Eine Siebdruckplatte hat den Vorteil, dass diese eine große Fläche für die Montage bildet, allerdings kann das Rohr nicht durch sie hindurch geführt werden, um beispielsweise einen 3D-Rohrbogen zu konstruieren.

Ein Holzrahmen ist einfach in der Verarbeitung und recht leicht, kann allerdings Probleme mit Feuchtigkeit bekommen. Nach der Recherche eignet sich am besten ein Alu-Steckprofil, dieses kann auf Maß bestellt und dann mithilfe eines Nutstecksystems und M8 Gewindeschrauben verbunden werden. Der Vorteil dieses Systems ist einerseits das geringe Gewicht der Profile und die einfache Verarbeitung. Die Verstrebungen können auch nachträglich in der Position verändert werden.

Daher wird ein Alu-Steckprofil verwendet.



Abbildung 45: Das Gestell ohne Rohre.

Dieses Gestell hat die Abmessungen von ca. 2,06 x 2 x 0,8 Meter (H/B/T). Zur besseren Mobilität wurden Rollen angebracht, sodass dies auch im später gefüllten Zustand mit einem Gewicht von vermutlich größer 100 Kg noch bewegt werden kann. Auf der Basis wurden zusätzlich noch zwei horizontale Streben zusätzlich verbaut, auf diesen Streben kann die Pumpe sowie ein Ausgleichsbehälter platziert werden.

8.1.3 Pumpe und Befüllung

Die letzte benötigte Komponente ist die Pumpe, hier wird eine Kreiselpumpe verwendet, da diese recht preiswert ist und für einfache Wasseranwendungen meist eine gute Wahl ist. Zusätzlich muss die Pumpe eine 230 V AC Spannungsversorgung aufweisen, da nicht überall 400 V AC zur Verfügung steht. Damit eine gute Messung aufgebaut werden kann, soll die Pumpe eine Strömungsgeschwindigkeit von mindestens einem Meter pro Sekunde erreichen. Dies entspricht einer Fördermenge von 7,07 m³/h. Es wurde eine TP 32-90/2 von Grundfos in DN 32 mit einer Nennfördermenge von 8,8 m³/h bei einer Nennförderhöhe von 7,3 Metern gewählt.

Bei einem geschlossenen Rohrsystem ist es recht schwer, sämtliche Luft aus dem System zu entfernen. Um diesen Vorgang zu vereinfachen, soll ein Ausgleichsbehälter verbaut werden. Durch die Energiezufuhr über die Pumpe wird das Wasser erwärmt. Die Wasserreserve im Ausgleichsbehälter kann das Überhitzen des Wassers und der Pumpe bei einem längeren Betrieb hinauszögern. Um die Montage möglichst einfach zu halten, wird hier ein 120-Liter-Fass mit offenen Deckel verwendet. Dadurch kann Luft aus dem Auslass der Leitung entweichen und in die Umgebung abgegeben werden.

8.1.4 Planung des Rohrverlaufs

Um Fehlerpotenzial zu ermöglichen, soll die Rohrleitung komplexer als ein einfaches Rechteck geplant werden. Diese Herausforderungen sind für die Evaluation wichtig, um den Schulungserfolg zu testen.

Es ergeben sich folgende Segmente in der Leitung. Jedes Segment beginnt mit einer Störquelle und endet mit einem Bogen, dementsprechend werden folgende Mindestlängen benötigt.

- Platz vor einem Bogen $5 \times \text{DN} = 0,25 \text{ m}$
- Platz für den Sensor ca. $0,3 \text{ m}$
- Pumpe $| 40 \times \text{DN} = 2 \text{ m}$
- 90° Bogen $| 10 \times \text{DN} = 0,5 \text{ m}$
- U/S Bogen $| 14 \times \text{DN} = 0,7 \text{ m}$
- 3D-Bogen $| 24 \times \text{DN} = 1,2 \text{ m}$
- Ventil $| 24 \times \text{DN} = 1,2 \text{ m}$

Diese Segmente lassen sich nun frei kombinieren, wobei die Pumpe am niedrigsten Punkt verbaut werden sollte, damit diese immer vollständig mit Wasser gefüllt ist. Zusätzlich wird in dieser Grundleitung ein Kugelhahn zur Befüllung und Entleerung des Systems verbaut. Daraus wurde das auf dem Bild Das fertige Gestell mit montierter Rohrleitung zu erkennende System erstellt.



Abbildung 46: Das fertige Gestell mit montierter Rohrleitung.

8.2 Aufbau des Rohrsystems

Der Aufbau des Rohrsystems erfolgte in zwei Schritten, zunächst wurde der geplante Rahmen aufgebaut, hierzu wurden die entsprechenden Alu-Profile als Maßarbeit bestellt. Der Zusammenbau der Elemente konnte nur mithilfe eines Inbusschlüssels abgeschlossen werden.

Anders sieht es bei dem Aufbau der Rohrleitung aus. Die PE-Rohre müssen zugeschnitten und verschweißt werden. Da für diese Arbeiten Fachwissen und spezielle Werkzeuge nötig sind, wurde die Konstruktion der Leitung durch Kevin Grams unterstützt.



Abbildung 47: Eine Impression aus der Rohrleitungskonstruktion. Links ein allgemeiner Montageschritt, in der Mitte der Schweißvorgang eines Bogens, rechts eine Nahaufnahme der verwendeten Rohrleitung.

Kapitel 9 **EVALUATION**

Zur Validierung des Nutzens und des Designs der Schulung wird zum Abschluss eine Evaluation durchgeführt. Im Folgenden wird dieser Prozess vom Evaluationskonzept, über den Fragebogen, einen Durchführungsbericht sowie einer Auswertung dargestellt.

9.1 Evaluations-Konzept

Für diese Arbeit kommen grundlegend zwei Evaluationskonzepte infrage.

9.1.1 Konzept einer A/B Studie

Ein Konzept könnte eine vergleichende Studie sein, hierzu würde eine Gruppe *A* an der VR-Schulung inklusive des Grundlagenvideos teilnehmen und eine Gruppe *B* nur eine Bedienungsanleitung zur Verfügung haben. Dies würde den gängigsten Fall repräsentieren, in dem der Kunde keine Vor-Ort-Schulung beauftragt. Nachdem die Nutzer sich mit dem Messgerät vertraut gemacht haben, führen sie dann eine reale Installation auf einem Prüfboard durch.

Hierbei könnte die benötigte Zeit für eine Installation gemessen werden. In der Auswertung können gemachte Fehler betrachtet und im Fragebogen die wahrgenommene Komplexität der Inbetriebnahme verglichen werden.

Dies würde untersuchen, ob durch die Schulung unter anderem die Installationsqualität gesteigert werden könnte.

9.1.2 Konzept einer Nutzbarkeitsstudie

Alternativ kann eine Nutzbarkeitsstudie durchgeführt werden, bei der nur eine Probandengruppe existiert. Die Probanden werden zunächst das Grundlagenvideo sowie die virtuelle Schulung durchlaufen. Darauf folgend führen die Teilnehmer dann eine reale Installation durch. Diese Studie könnte genauer untersuchen, wie benutzbar die Schulung ist und ob die Teilnehmer sich nach der Schulung gut auf eine Inbetriebnahme vorbereitet fühlen. Als Kennzahl kann untersucht werden, wie viele Teilnehmer ohne größere Fehler eine Inbetriebnahme erfolgreich durchführen können. Durch dieses Vorgehen ergibt sich hier ein exaktes Bild, da mehr Teilnehmer die Schulung durchlaufen als bei einer *A/B* Studie.

In Anbetracht des begrenzten Zeithorizonts und der daraus in Abschlussarbeiten meist begrenzten Probandenzahl soll hier eine Nutzbarkeitsstudie durchgeführt werden. Durch die erhöhte Gruppengröße werden genauere Erkenntnisse erwartet.

9.2 Zielgruppe

Die Zielgruppe der Schulung sind Personen, welche technische Vorerfahrung haben, jedoch wenig bis keine Erfahrung mit Clamp-On Energiemesstechnik, wie bereits im Abschnitt Didaktisches Konzept erwähnt. Im Rahmen der Evaluation ist es schwierig, solche Personen zu finden, daher wurde die Zielgruppe sehr offen gestaltet, der wichtigste Auswahlfaktor ist keine Erfahrung mit der Clamp-On Ultraschall Energiemesstechnik.

9.3 Erwartungen

Es wird erwartet, dass die Teilnehmer, je nach Kompetenz in der Bedienung eines VR-Programms, die Schulung gut bedienen können.

Weiterhin wird erwartet, dass die Teilnehmer nach der Schulung in der Lage sein werden, ein Clamp-On Ultraschall-Energiemessgerät in Betrieb zu nehmen. Es wird jedoch erwartet, dass es Unterschiede in der Qualität der realen Inbetriebnahme, abhängig von der Vorerfahrung und des Tätigkeitsfeldes der Person, geben wird.

9.4 Fragebogen

Aus diesem Konzept lässt sich ein zweiteiliger Fragebogen ableiten. Im ersten Teil werden allgemeine demografische Daten abgefragt. Mit Hilfe dieser Daten könnten Abweichungen bei bestimmten Gruppen erfasst und untersucht werden. Durch die Aufteilung müssen die Teilnehmer weniger Zeit am Stück mit dem Fragebogen verbringen, was dazu führen kann, dass die Fragen besser gelesen werden.

Der erste Teil gliedert sich in folgende Fragen:

- Welchem Geschlecht fühlst du dich zugehörig?
- Wie alt bist du?
- Was ist der höchste Bildungsabschluss, den du hast?
- Wie würdest du deinen aktuellen Beruf beschreiben

Bei den Berufsbeschreibungen stehen folgende Optionen zur Verfügung:

- Technischer Natur (Theoretisch)
- Technischer Natur (Praktisch)
- Geisteswissenschaftlich/ Sozialpädagogisch
- Handwerklich, nicht technisch
- Büroangestellter
- Arzt, medizinischer Beruf
- Verkäufer
- Manager
- Kein Beruf / Schüler
- Anderer

Des Weiteren werden Vorerfahrungen abgefragt:

- Wie viel Erfahrung hast du mit Messtechnik?
- Wie viel Erfahrung hast du mit Durchflussmesstechnik?
- Wie viel Erfahrung hast du mit Clamp-On-Durchflussmesstechnik?
- Wie viel Erfahrung hast du mit Virtual Reality?

Die Nutzer haben bei diesen Fragen die Auswahl zwischen:

- Keine
- Gelegentlich
- Regelmäßig < 1 Jahr
- Regelmäßig < 3 Jahre
- Regelmäßig > 3 Jahre

Diese Fragen sollen dazu dienen, mögliche Abweichungen in der Installation aufgrund der Vorerfahrung zu untersuchen. Im Rahmen der Studie sind vorwiegend Vorerfahrungen im Bereich der Messtechnik interessant, sowie Erfahrung mit VR, da diese bei der Teilnahme an der Schulung helfen können und sich gerade bei der Benutzbarkeit der VR-Schulung hier gegebenenfalls Unterschiede zeigen könnten.

Der zweite Teil des Fragebogens soll nach Abschluss der Schulung und des Praxisteils beantwortet werden. Hier können die Nutzer von ihren Erfahrungen aus der Evaluation berichten können.

Als Erstes wird die Benutzbarkeit der VR-Schulung untersucht. Bereits in der Bachelorarbeit wurde sich eingehend mit einigen Fragebögen zur Benutzbarkeit befasst [Ble22].

Hieraus ergab sich, dass der *System Usability Scale (SUS)* am besten von den 18 in einem Artikel des Fraunhofer-Instituts genannten Fragebögen [Fra] geeignet ist.

Diese Auswahl lässt sich auch auf diese Studie übertragen. SUS⁸ ist mit den zehn Fragen ein kompakter Fragebogen, darüber hinaus sind diese Fragen auch für die VR-Anwendung passend. Die Fragen lauten wie folgt: [Rau]

- Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen.
- Ich empfinde das System als unnötig komplex.
- Ich empfinde das System als einfach zu nutzen.
- Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen.
- Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.
- Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.
- Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu

SUS: Einige Fragen zur Benutzbarkeit eines Systems, entwickelt von John Brooke. Dieser Fragebogen wurde bereits validiert.[UPA]

⁸Erläuterungen und weiterführende Literatur zum SUS:
<https://germanupa.de/sites/default/files/2021-12/brooke1996sus.pdf>

beherrschen lernen.

- Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich.
- Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.
- Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.

Um die Passgenauigkeit zu erhöhen, musste eine Frage des SUS angepasst werden:

- Original: Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen.
- Angepasst: Ich kann mir sehr gut vorstellen ein solches System in der Praxis für neue Technologien zu nutzen.

Diese Anpassung wurde durchgeführt, da diese Schulung in der Regel nicht oft mit derselben Person durchgeführt wird, aber eine Person häufiger an unterschiedlichen ähnlichen Studien teilnehmen könnte.

9.5 Pilotstudie

Um die Bedienbarkeit und die Korrektheit der Schulung sicherzustellen, wurde die Schulung durch zwei Teilnehmer getestet. Der erste Teilnehmer stammt aus der Firma H. Hermann Ehlers GmbH, dieser konnte noch einige Fehler in der Bedienung finden, der grundlegende Inhalt der Schulung war allerdings korrekt.

Die zweite Testperson hatte keine Erfahrung mit dem Messgerät und auch keine Erfahrung mit VR oder First-Person-Computerspielen.

Daher war diese Person nicht wirklich vertraut mit der Bedienung solcher Systeme. Die VR-Schulung konnte jedoch trotzdem mit wenigen Einschränkungen benutzt werden. Es ist der Versuchsperson etwa schwergefallen, Gegenstände in der Hand zu behalten, während andere Aktionen durchgeführt wurden. Bei der Bedienung wurde vergessen, den Knopf zur Greifaktion gedrückt zu halten.

Im Anschluss an diesen Test wurden kleinere Verbesserungen durchgeführt.

9.6 Durchführungsbericht

Während der Durchführung wurde jeder Teilnehmer beobachtet. Dazu wurde das Sichtfeld des Teilnehmers während der VR-Schulung auf ein Smartphone übertragen.

9.6.1 Anpassung des VR-Erlebnisses

Die VR-Schulung kann die Dauer von zwei Stunden überschreiten, wenn sie komplett und sehr detailliert absolviert wird. Aus diesem Grund wurden die Module während der Evaluation teilweise gekürzt oder beschleunigt. Um dies

zu erreichen, wurde gerade im dritten Modul die Videoanleitung übersprungen und der Teilnehmer erhielt kürzere, teils direktere Anweisungen der auszuführenden Tätigkeit durch den Beobachter.

Ein Beispiel für die Beschleunigung ist die Software Solocue. Das erklärende Video ist zum aktuellen Stand knapp zehn Minuten lang. Die entsprechenden Schritte und auch weitere Einstellungen werden im Video detailliert beschrieben. Dies soll dem Teilnehmer dabei helfen, die Software besser zu verstehen. Außerdem soll es den Teilnehmer darauf vorbereiten, eigenständig die Konfiguration für verschiedenste Anwendungen anzupassen.

Für eine einfache Testmontage im Rahmen der Studie ist dieses tiefgreifende Verständnis nicht unbedingt erforderlich. Ebenso werden Einstellungen erläutert, welche nicht direkt die Messqualität beeinflussen, sondern zu einer besseren Ablesbarkeit des Messgeräts führen. Dies ist etwa die Einstellung der Anzeigeeinheiten von beispielsweise Liter pro Sekunde auf Kubikmeter pro Minute. Überdies wurde ein Datenspeicher konfiguriert, dieser ist für die Nachverfolgung von Ereignissen wichtig, nicht jedoch für die Studie.

Daher wurden einige Einstellungen bereits für den Teilnehmer angepasst, damit dieser sich auf die wichtigen Rohrparameter und Konfigurationen konzentrieren kann.

Jeder Teilnehmer hat jedoch auch Teile der Schulung nur mit Hilfe der integrierten Videos absolviert. So konnte der Teilnehmer beurteilen, ob er die Schulung auch ohne externe Hilfe absolvieren kann.

Die externe Hilfe, wurde an den vom Teilnehmer für die Schulung verfügbaren, Zeitrahmen angepasst. Manche Teilnehmer haben einige Stationen aus dem 4. Modul: Finden von Fehlern in einer Installation übersprungen, um die Schulung kürzer zu gestalten.

Dies führte zu einer unterschiedlich langen und intensiven Teilnahme an der Schulung. Eine intensive und längere Schulung hat das Ergebnis im anschließenden praktischen Teil deutlich positiv beeinflusst. Während der Schulung haben die Teilnehmer teilweise das Zeitgefühl verloren. So waren einige engagierte Teilnehmer im Anschluss über die verbrachte Zeit in der virtuellen Welt überrascht.

9.6.2 Erfolg des didaktischen Konzepts

Das Konzept der Wiederholung wichtiger Inhalte konnte erfolgreich beobachtet werden. Bei den Ein-/Auslaufstrecken wurde beobachtet, dass im zweiten Modul noch Fehler bei der Selektion mit dem Laserpointer gemacht wurden. Im dritten Modul konnte nahezu jede Person ohne Hilfe die korrekte Montage an der Rohrleitung finden.

Einige Personen haben bei Unsicherheiten während der Bearbeitung des zwei-

ten Moduls im ersten Modul erneut die Ein-Auslaufstrecken betrachtet. Alle Teilnehmer, die dies getan haben, konnten in dem dritten Modul schnell die geeignete Messstelle finden. Bei den anderen Teilnehmern, die nicht nachgeschaut, sondern geraten haben, konnte eine deutlich unterschiedliche Zeit bis zur korrekten Auswahl der Messstelle im vierten Modul beobachtet werden.

Die Vertiefung der Verwendung von Koppelpaste und die Zuordnung von RTD 1 und 2 haben Wirkung gezeigt. Im dritten Modul waren die Nutzer hier unsicher und mussten auf die Erklärung durch das Video oder den Beobachter warten. Bei den Teilnehmern, die die einzelnen Module sorgfältig absolviert haben, konnte beobachtet werden, dass diese Faktoren im vierten Modul eigenständig berücksichtigt wurden.

Insbesondere in der Praxis war jedem Teilnehmer die Abfolge der Schritte der Montage der Ultraschallsensoren bewusst und konnte korrekt angewendet werden.

Der Ultraschallsensorabstand wurde ebenfalls vertieft, konnte in der Praxis jedoch nur teilweise umgesetzt werden, da hier statt einer digitalen Anzeige ein Millimetermaß verwendet wird. Personen, die wenig Erfahrung mit solchen Maßanzeigen haben, hatten hier Probleme. Personen, die in der Praxis häufiger mit einem Meterstab oder ähnlichem arbeiten, konnten den Abstand auch ohne Hilfe korrekt einstellen.

Weiter ist positiv der Gamification-Ansatz aufgefallen, so hatten einige Nutzer im zweiten Modul sehr viel Spaß und Ehrgeiz, eine möglichst hohe Punktzahl zu erreichen. Somit haben sie teilweise genau überlegt, welche Rohrsegmente die Vorgabe für Ein-/Auslaufstrecken erfüllen.

Im vierten Modul, in dem die Fehlersuche behandelt wurde, hatten die Teilnehmer teilweise auch sehr viel Spaß. Dies lag nach Berichten der Teilnehmer an der Herausforderung, bei der sie ohne direkte Anleitung die Fehler in den Installationen finden und beseitigen mussten. Die Teilnehmer haben es als erfreulich empfunden, dass eine Handlung korrekt gemeldet wurde. Ebenso zeigten sie Ehrgeiz, wenn eine Handlung durch das System als fehlerhaft angemerkt wurde.

9.6.3 Probleme in der VR-Schulung

Negativ ist in der Schulung aufgefallen, dass noch drei Fehler in der Anwendung vorhanden waren. So kam es unter bestimmten, noch ungeklärten Umständen dazu, dass ein Teilnehmer den Ferritkern und das USB-Kabel nicht am Gerät montieren konnte. In anderen ungewöhnlichen Fällen gab es in Modul drei, nicht aber in Modul vier Probleme mit dem Auftragen der Koppelpaste. Außerdem hat ein Teilnehmer an Motion-Sickness gelitten, dies könnte auf die

vereinfachte Kantenglättung und verringerte Auflösung bei entfernten Objekten zurückgeführt werden. Diese sorgen teilweise für ein Flimmern oder Verschwimmen an scharfen Kanten.

Dies könnte durch die Verwendung von PC-VR-Erlebnissen verbessert werden, da diese durch mehr Rechenleistung eine bessere Auflösung und Kantenglättung ermöglichen. Zusätzlich könnte die Anwendung auch besser für mobile VR-Brillen wie die Meta Quest 3 optimiert werden.

Einige Personen hatten auch zu Beginn Probleme mit der Bedienung der Controller, da diese vorher keine Erfahrung mit solchen hatten. Diese Probleme sorgten etwa dafür, dass die Greiftaste zunächst schwer zu verwenden war oder der Joystick zur Teleportierung nicht gefunden wurde.

Mit der Bedienung der Objekte konnten wenige Probleme beobachtet werden. Wenige Personen haben etwas mehr Zeit für die Sensorabstandseinstellung benötigt. Teilweise ist das Greifen des Sensorblocks den Teilnehmern schwergefallen. Gleiches gilt für die korrekte Abstandseinstellung, da hier Feinfühligkeit in der Bewegung benötigt wird.

Ähnliches konnte bei der Bedienung von Solocue beobachtet werden. Einige Personen haben öfter eine falsche Auswahl im Dropdown-Menü oder gar das falsche Menü getroffen. Die Auswahl war schwieriger, wenn die Personen größeren Abstand zum Programm gehalten haben, da dann die Laserstrahlen länger waren. Dadurch haben kleinere Bewegungen der Hand zu größeren Bewegungen auf der Softwareoberfläche geführt.

Die Platzierung der Temperaturfühler auf den Rohren hat teilweise auch eine Herausforderung dargestellt. Die Temperaturfühler sind sehr kleine Objekte und durch die fehlende Haptik schwer richtig in die Hand zu nehmen, dadurch wurden für die Platzierung teilweise mehrere Versuche benötigt.

9.6.4 Beobachtung des praktischen Teils, Montage am Prüfboard

Bei der praktischen Inbetriebnahme haben die Teilnehmer zusätzlich zum Werkzeug ein zweiseitiges A4 Dokument erhalten, mit folgendem Inhalt:

- Ein-/Auslaufstrecken als Skizze wie im Videomodul.
- Montagepositionen der Ultraschallsensoren aus der ersten Station in Modul vier.
- Die Anschlusspläne der Kabelenden aus der Bedienungsanleitung.

Diese Inhalte wurden gewählt, da sie eine reine Merkaufgabe sind und gerade die Verkabelung schnell vergessen werden kann. Um diese Informationen korrekt zu verwenden, musste der Teilnehmer jedoch in der Schulung aufpassen.

Neben der Zeit, die in der Schulung verbracht wurde, sind auch die Erfahrungen mit Heizsystemen, Rohrleitungen, Messtechnik oder komplexen Gerätschaften von Bedeutung. Komplett fachfremde Personen haben meist mehr Schwierigkeiten gehabt, als etwa eine Person, die im Bereich der Anlageninstallation tätig ist.

Dabei ist besonders aufgefallen, dass einige fachfremde Teilnehmer Probleme hatten, die Ein-/Auslaufstrecken in die Praxis zu übertragen. Diese Teilnehmer haben nach Flanschen (Verbindungselemente) an der Rohrleitung gesucht, um die Strecken einzuschätzen. Nach einem Hinweis, dass sie hier einen Meterstab verwenden müssen, konnten Sie die Zahlen jedoch größtenteils übertragen. Personen mit passender Vorerfahrung hingegen konnten die Strecken besser einordnen.

Ebenso haben einige Personen den Ferritkern vergessen und bei Erinnerung an diesen Schritt konnten sie größtenteils die Montage des Kerns nicht übertragen. Es wird vermutet, dass dies daran liegt, dass der Kern nur an einer Stelle in der Schulung vorgekommen ist. Der Ferritkern vermindert den Einfluss von elektromagnetischen Störsignalen. Sind diese Störsignale nicht vorhanden, hat das Fehlen dieses Elements wenig Auswirkungen auf die Messung.

Es konnten nach der Schulung jedoch alle Teilnehmer das Messgerät erfolgreich in Betrieb nehmen. Bei einigen Teilnehmern mussten allerdings zwischendurch Hinweise gegeben werden. Die meisten Probleme bei der Installation hätte ein Teilnehmer bei komplett eigenständiger Arbeit auch mit der Bedienungsanleitung lösen können. Aufgrund der Abstraktion in der Bedienungsanleitung hätte vermutlich jedoch das technische Verständnis zum eigenständigen Arbeiten ohne die VR-Schulung gefehlt.

Im Rahmen der Beobachtung lässt sich abschließend feststellen, dass Teilnehmer mit technischer Vorerfahrung das Messgerät ohne externe Hilfe in Betrieb nehmen könnten. Eine Voraussetzung hierbei ist allerdings eine entsprechend engagierte Teilnahme an der VR-Schulung.

9.7 Auswertung der Fragebögen

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der beiden Fragebögen ausgewertet und erläutert. An der Studie haben insgesamt 24 Personen teilgenommen.

9.7.1 Demografie

Es sind 70,8 % der Teilnehmer männlich und 29,2 % weiblich. Bei der Altersverteilung sind fast alle Altersgruppen vertreten, die beiden jüngsten Teilnehmer fallen in die Gruppe der 15- bis 19-Jährigen und der älteste Teilnehmer

ist zwischen 55 und 59 Jahren alt. Dabei ist die stärkste Gruppe die der 20- bis 24-Jährigen mit 37,5 % der Teilnehmer, die zweit- und drittstärkste Gruppe entspricht der 25- bis 29-Jährigen mit 25 % und die der 40- bis 44-Jährigen mit 12,5 %. Insgesamt sind 70,8 % der Teilnehmer unter 30 Jahre alt.

In Bezug auf die Bildung gab es zwei gleich starke Gruppen mit je 33,3 % der Teilnehmer, diese haben entweder die Mittlere Reife abgeschlossen oder die allgemeine Hochschulreife erreicht. Zwei Personen haben als höchsten Abschluss ein Diplom oder Master, zwei Personen sind noch Schüler. Einen Doktorgrad hat keiner der Teilnehmer erreicht.

Im Rahmen der beruflichen Tätigkeiten sind fast alle Antwortoptionen vertreten, es ist allerdings kein Manager unter den Teilnehmern. Hierbei stechen die Gruppe der Büroangestellten und im medizinischen Bereich tätigen Personen mit einem Anteil von je 20,8 %. Am zweitstärksten sind die Gruppen der Techniker aus dem praktischen Bereich sowie die Verkäufer mit je 12,5 %.

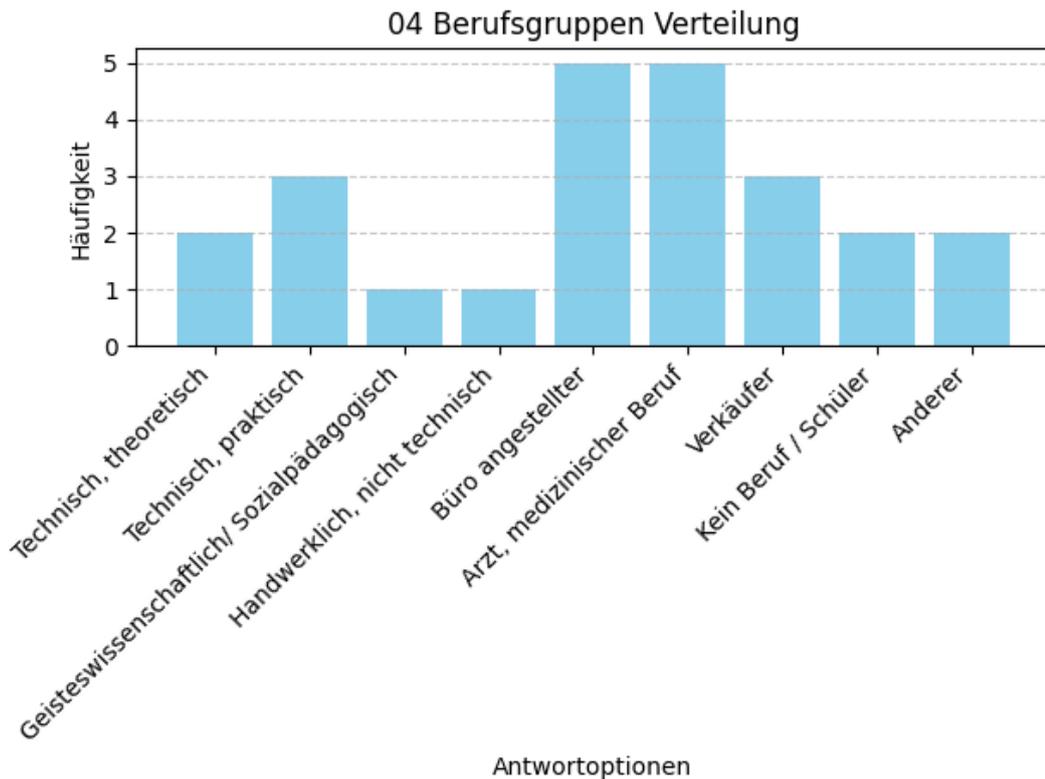


Abbildung 48: Die gewählten Berufsgruppen der Teilnehmer.

Nach Betrachtung dieser Daten fällt auf, dass die Demografie der Teilnehmer stark durchmischt ist. Durch diese Durchmischung ist ein Einfluss auf das Ge-

samtergebnis durch einseitige demografische Ausprägungen weniger wahrscheinlich.

9.7.2 Vorerfahrungen

Mit Messtechnik im Allgemeinen haben 45,8 % der Teilnehmer keine Erfahrung. 33,2 % der Teilnehmer haben hingegen regelmäßig Erfahrung mit Messtechnik und 20,8 % benutzen diese gelegentlich. An dieser Stelle war sämtliche Messtechnik gemeint, so haben Mediziner etwa häufig Erfahrung mit Blutdruckmessgerät oder anderen medizinischen Gerätschaften.

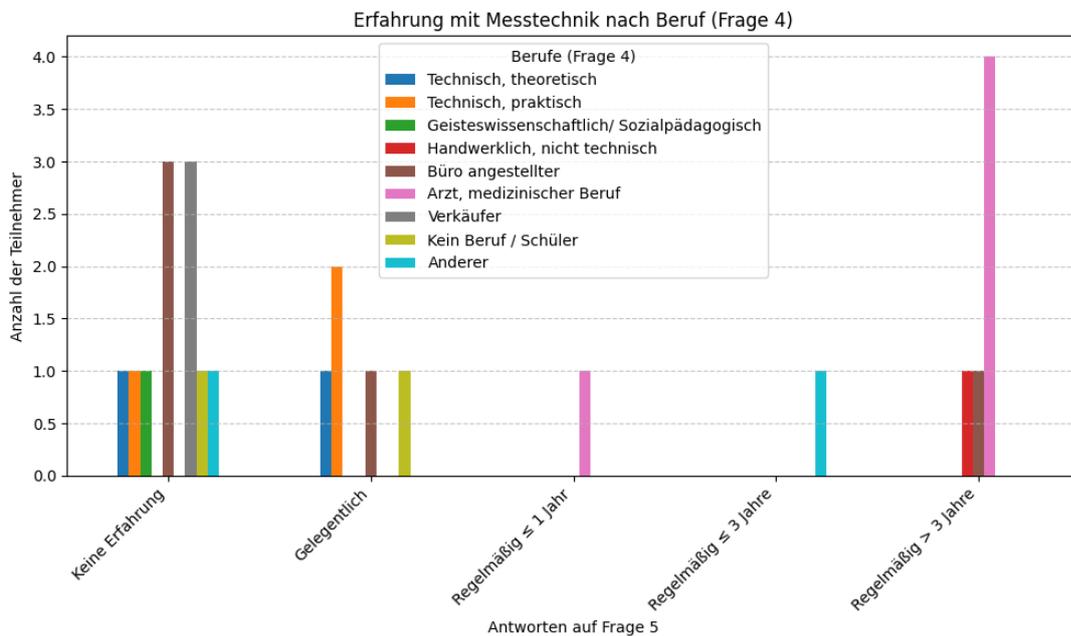


Abbildung 49: Verteilung der Berufsgruppen auf die gewählten Antworten zur Erfahrung mit Messtechnik.

Bei Betrachtung der Abbildung 49 fällt auf, dass die Berufsgruppe mit der meisten messtechnischen Erfahrung die Mediziner sind.

Mit Durchflussmesstechnik haben die meisten Teilnehmer, 79,2 % keine Erfahrung, lediglich 12,5 % der Teilnehmer haben gelegentliche und 8,3 % mehr als drei Jahre regelmäßige Erfahrung mit Durchflussmesstechnik.

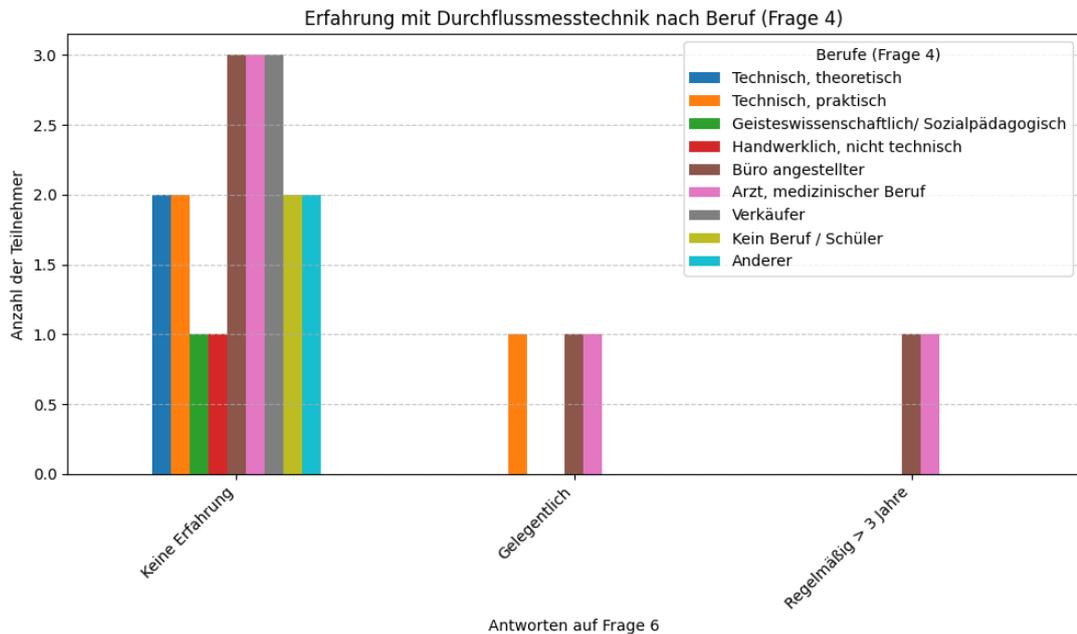


Abbildung 50: Die Erfahrung mit Durchflussmesstechnik aufgeteilt nach Berufsgruppen.

In diesem Bereich haben die Büroangestellten und Mediziner die meiste Erfahrung. Mit Clamp-On Durchfluss Messtechnik hat hingegen keiner der Probanden Erfahrung, dies passt zu dem Ziel dieser Studie.

Die Angaben zur Erfahrung mit VR zeigen einen starken Trend, 62,5 % der Teilnehmer haben keine Erfahrung mit dieser Technik. 25 % haben gelegentlich und 12,5 % seit weniger als einem Jahr regelmäßige Erfahrung mit VR.

9.7.3 Antworten zu der Benutzbarkeit des Systems

Zur Auswertung der Benutzbarkeit des Systems wird zunächst der SUS ausgewertet. Als mittlerer Gesamtwert ergibt sich ein SUS-Score von 88,85. Auf der Skala entspricht dies einer exzellenten Benutzbarkeit nach Bangor et al. 2009.[Rau]

Frage	Durchschnitt	Standardabweichung	RSD (%)
Frage 1	3.58	0.9743	27.22
Frage 2	3.88	0.4484	11.56
Frage 3	3.67	0.4815	13.12
Frage 4	2.29	1.4885	65.00
Frage 5	3.96	0.2041	5.15
Frage 6	3.79	0.6580	17.36
Frage 7	3.62	0.4945	13.66
Frage 8	3.92	0.4082	10.41
Frage 9	3.46	0.8330	24.08
Frage 10	3.38	1.0959	32.42
Gesamt-Score	88.85	8.4371	9.50

Tabelle 1: System Usability Scale (SUS) Ergebnisse mit relativer Standardabweichung (RSD).

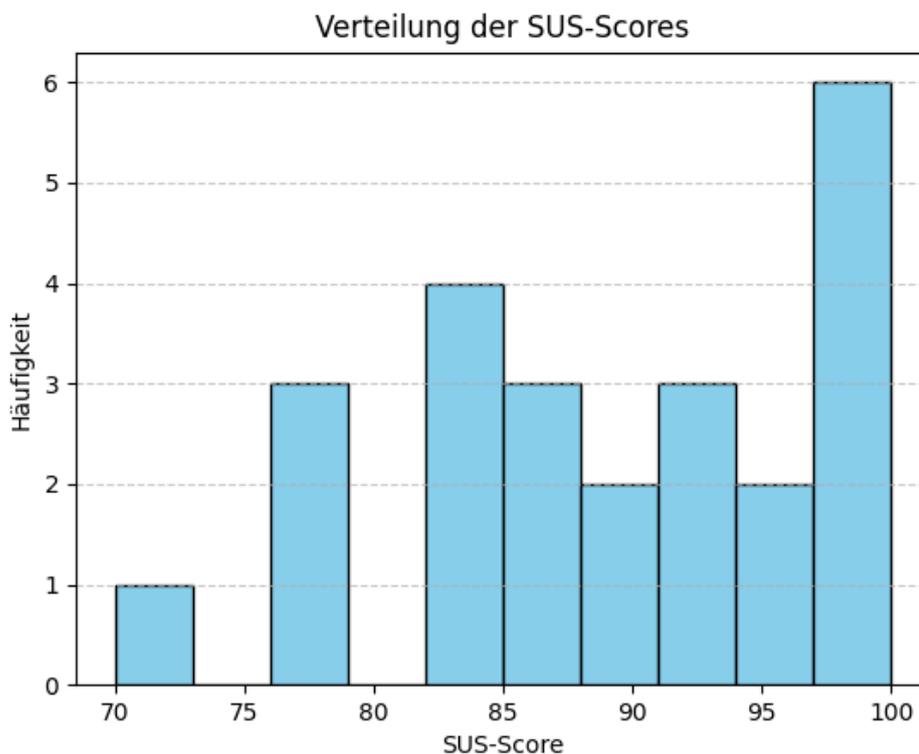


Abbildung 51: Die Verteilung des SUS-Scores.

Wird der SUS-Score pro Teilnehmer betrachtet, so fällt auf, dass sechs Teilnehmer einen sehr hohen SUS Score von 96 oder höher vergeben, jedoch auch ein Teilnehmer einen Score von 70 und drei Teilnehmer einen Score von 77,5 angeben. Um dies genauer zu untersuchen, werden diese Teilnehmer auf ihre demografischen und Erfahrungsdaten untersucht. Bei den sechs Teilnehmern ergeben sich wenig Gemeinsamkeiten, alle sind jünger als 34 Jahre und haben unterschiedliche Berufe und Bildungsabschlüsse. Auch die Vorerfahrungen unterscheiden sich, allerdings haben drei der Teilnehmer mindestens gelegentlich Erfahrung mit VR und alle Teilnehmer sind männlich. Insgesamt hat nur eine einzige weibliche Person einen SUS-Score von mindestens 88,85 vergeben, 54,5 % der Personen, die einen Score von weniger als 88,85 vergeben haben, waren weiblich.

Die Person mit dem niedrigsten Score ist weiblich, 20- bis 24 Jahre alt, hat Abitur sowie einen technisch theoretischen Beruf. Überdies hat sie mit keiner der abgefragten Techniken Erfahrung.

Bei Betrachtung der einzelnen Fragen des SUS fällt auf, dass diese Person bei Frage vier null Punkte vergeben hat und auch bei Frage neun und zehn nur zwei Punkte vergibt. Daraus lässt sich schließen, dass die Person technischen Support benötigt und sich bei der Bedienung des Systems unsicher gefühlt hat, so wie eine Menge lernen musste.

Da diese Person auch keine Erfahrung mit dem Medium VR hat, könnte dies die Ursache für die entsprechende Bewertung sein, da gerade die Steuerung mittels der beiden Controller für den Start anspruchsvoll sein kann. Die Person hat keine Anmerkungen zur Bedienung gemacht, daher kann hier nur aufgrund der Beobachtung während der Studie ein Schluss gezogen werden.

Die anderen drei Personen haben unterschiedliche demografische Daten, sind jedoch alle männlich und unter 30 Jahre alt, eine Person hat gelegentliche Erfahrung mit VR. Es fällt auf, dass alle Personen technischen Support bei der Benutzung des Systems benötigen. Eine Person gibt an, dass es zu viele Inkonsistenzen gegeben habe, stimmt allerdings der vorherigen Frage nach der guten Integration eher zu, dies könnte auf einen fehlerhaft ausgefüllten Fragebogen hinweisen, da sich dies widerspricht. Die beiden anderen Personen gaben an, eine Menge Dinge lernen zu müssen, damit das System benutzbar ist.

Einer der Nutzer bestätigte dies durch eine Anmerkung, dass die Bedienung der VR-Brille an sich erst erlernt werden musste.

Daraus lässt sich schließen, dass etwa eine kurze vorab Videoanleitung speziell für die Bedienung des VR-Systems erstellt werden sollte und zusätzlich das Einführungslevel optional detaillierter, ähnlich zu dem Tutorial in einigen Computerspielen ausgebaut werden sollte. Dies wird durch die durchschnitt-

liche Punktzahl auf Frage vier gestürzt, scheinbar haben sich einige Nutzer mehr Support für den Start gewünscht, da diese Frage mit Abstand am wenigsten Punkte erhalten hat.

Interessant ist auch, dass eine Person VR für ein nicht geeignetes Medium zum Lernen hält, basierend auf der Anmerkung des Nutzers hat dieser an Motion-Sickness gelitten.

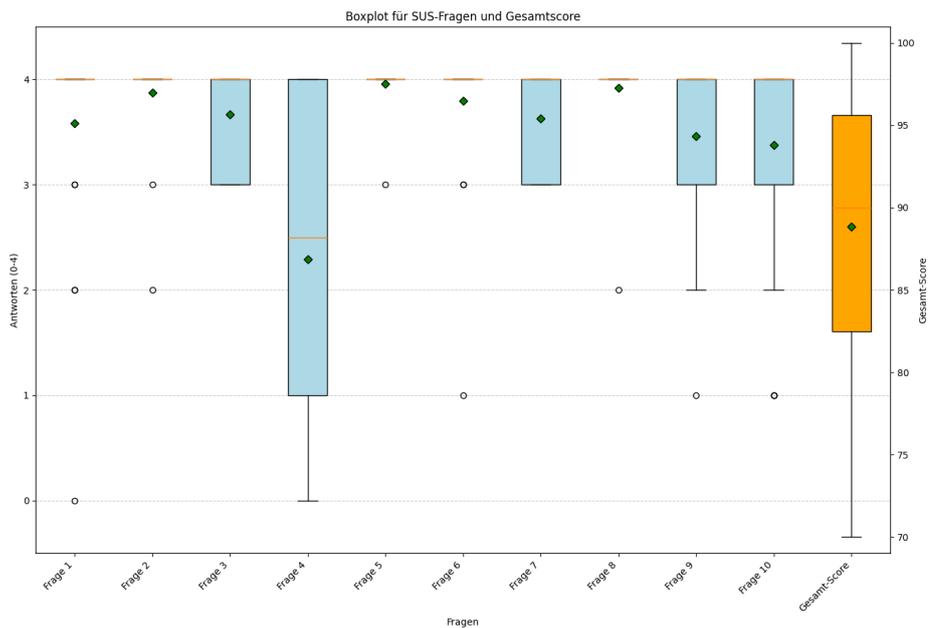


Abbildung 52: Die Verteilung der Antworten auf die Fragen des SUS als Boxplot. (Die Raute stellt den Mittelwert dar.)

Bei Betrachtung der Verteilung der Antworten auf die einzelnen Fragen des SUS fällt auf, dass die Benutzer bei Frage 1,2,5,6 und 8 ähnliche Einschätzungen vorgenommen haben, teilweise gab es vereinzelte Ausreißer. Dementsprechend würden die meisten Teilnehmer VR für Schulungen gerne häufiger benutzen. Ebenso wurde die Bedienung als wenig komplex und einfach empfunden, ferner scheinen die einzelnen Funktionen gut integriert zu sein.

Eine starke Heterogenität gab es hingegen bei der Frage nach dem benötigten technischen Support, Gründe und Lösungen hierfür wurden bereits oben erläutert.

Weitere Unterschiede gab es bei der Bewertung von Frage 3,7,9 und 10. Es existiert scheinbar eine gewisse Einschränkung bezogen auf die Einfachheit

der Bedienung. Dementsprechend gab es teilweise eine leichte Unsicherheit bei der Bedienung der Schulung, möglicherweise bedingt dadurch, dass teilweise einiges zur Bedienung erst erlernt werden musste.

Bei der Betrachtung des Gesamt-Scores fällt auf, dass Mittelwert und Median nahe beieinander liegen und der Score generell über eine kompakte Ausdehnung im oberen Bereich der Skala liegt, dies bestätigt die als gut, bis sehr gut bewertete Nutzbarkeit.

Zusätzlich zum SUS wurde der Nutzer gefragt, ob dieser die Schulung für angemessen lang befindet, diese Metrik könnte durch die Kürzung der Schulung beeinflusst worden sein. Hier stimmten 75 % der Teilnehmer im vollen Umfang und 16,6 % teilweise zu. 8,3% der Nutzer blieben hier neutral, mit der Anmerkung während der Studie, sie könnten es aufgrund der Kürzung nicht richtig beantworten.

9.7.4 Fragen zur Inbetriebnahme

62,5 % der Teilnehmer gehen davon aus, dass sie nach der VR-Schulung das Ultraschall-Energiemessgerät sicher und korrekt in Betrieb genommen haben, 37,5 % der Teilnehmer stimmen dem teilweise zu.

Die Mehrheit, 91,6 % der Teilnehmer, findet auch, dass sie diese Aufgabe ohne die Schulung nicht so gut bewältigt hätten. Je 4,2 % der Teilnehmer stimmen dem nur teilweise zu, oder sind neutral dem gegenüber.

Bei der Frage: „Durch die Schulung habe ich mich im Umgang mit dem Messgerät sicher gefühlt.“ ist die Verteilung etwas verhaltener, 58,3 % stimmten dieser Aussage voll, 37,5 % teilweise zu. Auch hier blieben 4,2 % der Nutzer neutral.

Hierbei fällt auf, dass jeweils unterschiedliche Personen die Angabe neutral bei verschiedenen Fragen gewählt haben.

Keinem der Teilnehmer haben in der Schulung wichtige, bei der Inbetriebnahme benötigte Aspekte gefehlt.

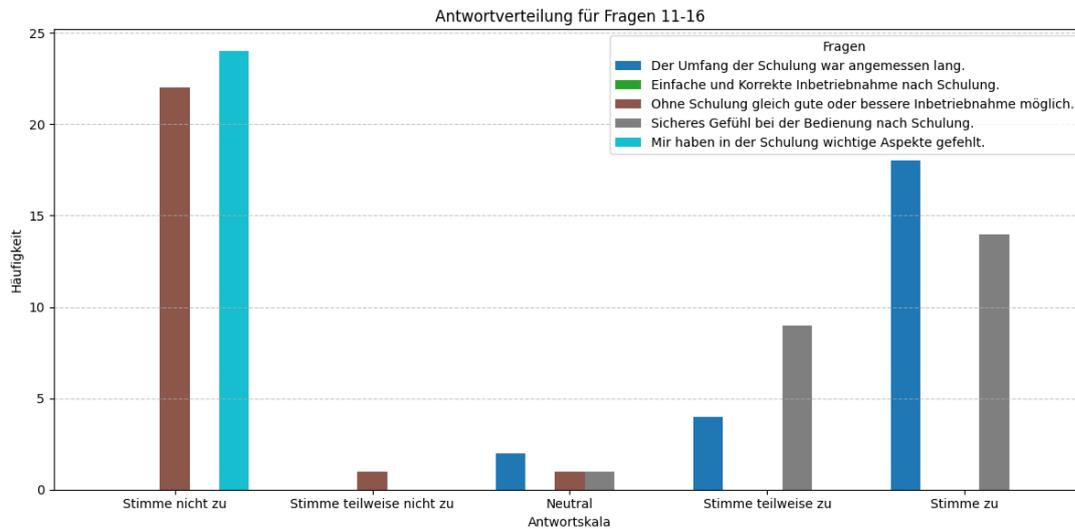


Abbildung 53: Die Antworten auf die Fragen zur Inbetriebnahme.

9.8 Fazit der Evaluation

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Mehrheit der Benutzer die Schulung als gut benutzbar empfunden hat. Gleichzeitig haben die meisten Teilnehmer sich gut auf die Inbetriebnahme vorbereitet gefühlt. Wie erwartet fiel jedoch auf, dass es sowohl in der Schulung als auch im praktischen Teil Unterschiede durch die individuellen Fähigkeiten und Vorerfahrungen gegeben hat.

Insgesamt haben die meisten Teilnehmer nach der Studie bestätigt, dass die VR-Schulung ihnen Spaß bereitet hat und sie sich gut vorstellen könnten, auch in anderen Bereichen an solchen Schulungen teilzunehmen. Dies findet sich auch in einigen Anmerkungen aus dem Fragebogen wieder.

Besonders gut gefallen hat den Nutzern der Aspekt, dass sie während der Schulung viel Zeit mit eigenem Handeln verbracht haben und durch die virtuelle Umgebung keine Angst hatten, etwas zu zerstören oder andere größere Fehler zu tätigen.

Die Wahl des Mediums VR gegenüber dem des klassischen Desktops hat dies laut Teilnehmer verstärkt. Diese Verstärkung kommt durch einen besseren Bezug zur realen Handlung. Da anders als bei einem Desktop in VR jede Handlung körperliche Aktivität erfordert und durch die, der Wirklichkeit ähnlichen Replikationen der Objekte, ein Gefühl von Realität aufkam. Zusätzlich war die Fokussierung auf die Inhalte ohne Ablenkung gegeben. Die Nutzer waren durch die VR-Brille in der eigenen virtuellen Welt fokussiert, sodass weder Smartphone noch Objekte im realen Raum für Ablenkung sorgen konnten.

Diese Fokussierung wird auch durch das Verlieren des Zeitgefühls während des VR-Teils bestätigt.

Die Begeisterung für das Medium VR kann jedoch auch zum Teil der Neuheit des Mediums zugeschrieben werden, da die meisten Teilnehmer hier keine Erfahrung hatten. Bei entsprechender Verbreitung solcher Schulungen könnte das Interesse geringer werden.

Auch die vorherige Grundlagenschulung mittels Video wurde positiv aufgenommen. Während des Videos konnte allerdings beobachtet werden, dass die Teilnehmer leichter abgelenkt wurden und so teilweise nicht die volle Konzentration vorhanden war.

Der Inhalt des Videos wurde von einigen Teilnehmern als teilweise sehr komplex und schwierig wahrgenommen, sodass dieses nicht vollumfänglich verstanden wurde. So haben gerade die mathematischen Formeln für Unverständnis gesorgt. Allerdings haben alle Teilnehmer unabhängig von der Vorerfahrung am Ende des Videos bestätigt, dass sie zumindest eine grundlegende Idee von dieser speziellen Messtechnik haben.

Kapitel 10 **AUSBLICK**

Im Rahmen der Nutzertests und der Entwicklung sind einige Grenzen sowie Möglichkeiten der Weiterentwicklung aufgefallen, in diesem Abschnitt werden diese kurz erläutert.

10.1 Begrenzungen

Im Rahmen der Evaluation sind jedoch auch die Grenzen der bisher entwickelten Schulung deutlich geworden. So gilt es vor der Veröffentlichung dieser Schulung zuerst, die gefundenen Fehler zu beheben.

Ebenso sollte auch der Inhalt noch erweitert werden. So sollten insbesondere im Modul zwei mehr Rohrabschnitte eingebaut werden. Dadurch erhält der Teilnehmer einen noch besseren Eindruck der Ein- und Auslaufstrecken. Dabei sollten auch für verschiedene Nennweiten verwendet werden.

Der dadurch erhöhte Zeitaufwand der Teilnehmer kann relativiert werden. Zum einen haben die Nutzer bei dem bisherigen Umfang am Ende meist noch viel Motivation. Überdies wurde von einigen Teilnehmern gewünscht, die Anzahl der Testrohrleitungen zu erhöhen. Außerdem ist der Umfang der Schulung mit zwei bis drei Stunden recht kurz im Verhältnis zu klassischen Schulungen, hier kann bis zu einem Tag eingeplant werden.

Eine weitere Beschränkung ist das Level vier, hier könnten auch nach Wunsch der Teilnehmer mehr Situationen dargestellt werden. Gegebenenfalls sollte die Prüfung weicher gestaltet werden, sodass etwa ein falsch montiertes Ultraschallsensorkabel durch die Einstellung in der Software korrigiert werden kann.

Bei der abschließenden praktischen Anwendung ist aufgefallen, dass nicht alle Inhalte direkt übertragbar waren. Dies könnte etwa durch die genauere Darstellung in der virtuellen Welt, oder durch mehr Handlungsoptionen bei diesen Themen verbessert werden.

Durch die Evaluation ist zusätzlich aufgefallen, dass einige Nutzer Probleme mit der Bedienung des VR-Geräts und der Schulung hatten. Eine Videoschulung vorab zur Benutzung der speziellen Hardware, so wie eine optionale schrittweise Einführung in der virtuellen Welt könnte hier helfen. Für diese Einführung könnten etwa Avatare mit den Controllern in der Hand oder Bilder eingefügt werden, die sukzessive die Bedienung in der Schulung einführen, sodass der Nutzer jede Funktion der Bedienung einzeln erlernen kann.

Abschließend ist noch zu erwähnen, dass einige 3D-Modelle sehr einfach dargestellt werden, hier könnten zur Erhöhung der Immersion detailliertere Modelle verwendet werden. Gleiches gilt für einige Physiksimulationen, so verhalten sich die Temperaturfühler-Kabel teilweise unrealistisch.

10.2 Ausbau und Weiterentwicklung der Schulung

Um die Schulung noch besser zu gestalten, könnten weitere Funktionen implementiert werden. In diesem Abschnitt wird auf Ideen für Erweiterungen eingegangen.

10.2.1 Weitere Module

Um die Bedienung und die Einbindung des Messgerätes in bestehende Infrastruktur noch genauer zu schulen, könnten noch weitere optionale Module eingeführt werden. Ideen hierzu sind die Folgenden:

- Schnittstellen Module, diese könnten den Anschluss und die Einrichtung sowie Verwendung von verschiedenen vorhandenen Schnittstellen im Detail erläutern.
- Experteneinstellungen, hier könnte genauer auf verschiedene fortgeschrittene Optionen eingegangen werden.
- Kalibrierung, in diesem recht kurzen Modul könnten die Möglichkeiten und Einstellungen zu einer Kalibrierung vermittelt werden.
- Ein zusätzliches Modul oder die Auswahl zwischen den verschiedenen verfügbaren Sensortypen könnte die Anwendbarkeit in verschiedensten Installationsumgebungen verbessern.

Ebenso könnte auch das Grundlagenvideo in mehrere Videos geteilt werden. Durch diese Aufteilung könnten die grundlegenden Faktoren zu Beginn genauer erläutert werden. Die technischen Feinheiten und Unterschiede zwischen der virtuellen und realen Welt könnten in einem Video im Anschluss zum VR-Teil vermittelt werden.

10.2.2 Weitere Funktionen

Um den Teilnehmern ein besseres Verständnis der Hydraulik und des Ultraschall-/Messgeräteverhaltens in verschiedensten Situationen zu vermitteln, könnte eine entsprechende Simulation hinzugefügt werden. Die hydraulische Simulation (Numerische Strömungsmechanik) ist sehr aufwendig, daher müsste zunächst experimentiert werden, wie diese am besten in VR darstellbar ist.

Hierbei könnten verschiedene Faktoren simuliert werden:

- Fließgeschwindigkeitsanpassungen.
- Einfluss verschiedener Störkörper in verschiedenen Abständen bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten.

- Einfluss verschiedener Medien und Rohrleitungsmaterialien sowie Nennweiten.
- Einfluss von unterschiedlich fortgeschrittenen Ablagerungen oder Korrosion.
- Einfluss von Fehlern in der Parametrierung und Montage auf das Messergebnis in verschiedenen Situationen.

Ferner könnten die Videos etwa durch dreidimensionale Avatare/Hologramme ersetzt werden, welche den Teilnehmer begleiten und die Handlungen direkter im unmittelbaren Umfeld des Teilnehmers vorführen, dies könnte das Verständnis erweitern und die Bedienung erleichtern.

Gleichzeitig könnten die Erklärungen so granularer aufgeteilt und eventuell umfangreicher oder tiefgreifender erläutert werden.

Kapitel 11 **ABSCHLUSS FAZIT**

Basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit lassen sich folgende Schlüsse ziehen. Es wurde eine grundlegend benutzbare VR-Schulung angefertigt. Diese Schulung könnte nach Behebung der gefundenen Fehler von realen Anwendern verwendet werden. Durch die Studie wurde gezeigt, dass auch fachfremde Personen nach Teilnahme an der Schulung ein grundlegendes Verständnis für die korrekte Benutzung der Messtechnik haben. Es wurde jedoch auch gezeigt, dass Teilnehmer mit Fachbezug trotz des beschleunigten Durchlaufs im Rahmen der Evaluation bereits ein Messgerät recht sicher in Betrieb nehmen konnten.

Um eine einfache Bedienung der Schulung durch die Teilnehmer sicherzustellen, sollte jedoch wie im Abschnitt Begrenzungen beschrieben, eine schrittweise Einführung in die Bedienung hinzugefügt werden.

Weiterhin könnte der Umfang wie im Abschnitt Weitere Funktionen erweitert werden, gerade der Wechsel von Anleitungsvideos zu 3D-Avataren könnte eine Lernsteigerung bewirken.

Bei der Erweiterung des Umfangs muss allerdings darauf geachtet werden, dass nicht zu viel, in zu kurzer Zeit vermittelt werden soll.

Damit das Gezeigte noch besser in die Praxis übertragen werden kann, könnten einige Interaktionen detaillierter gestaltet werden.

Spätestens nach der Integration dieser Funktionen sollte eine einwandfrei benutzbare und effektive Schulung sichergestellt sein.

Kapitel A **GLOSSAR**

Blueprint Eine Art Baustein, der durch den Programmierer erstellt wird und beliebig oft auf der Karte eingefügt werden kann. Besteht meist aus einer Kombination von geometrischen Objekten und Code, welcher Funktionen zu den Objekten hinzufügt, bspw. eine öffnende Tür. 12, 38, 44

Clamp-On Ultraschall Energiemessgerät Ein Messgerät, mit dem der Wärme-/Kälteenergiefluss innerhalb einer Rohrleitung gemessen werden kann. Dazu werden von außen zwei Sensoren auf die Rohrleitung geklemmt, ohne diese zu öffnen. 1, 7, 11, 14, 57

EN1434 Eine Europannorm zur Berechnung der Wärmemenge im Abrechnungsverkehr, unter anderem ist hier spezifiziert, wie die Wärmemenge berechnet wird. Clamp-On Messungen können aufgrund der veränderbaren Bauform nicht für den Abrechnungsverkehr verwendet werden, daher ist die Berechnung hier in Anlehnung an die Norm. 6

Force-Feedback Eine physische Rückmeldung des Eingabegerätes. Dies wird häufig durch ein Vibrieren des Gerätes umgesetzt. 19, 25

Motion-Sickness Ein Nutzer erfährt Schwindel, Übelkeit oder ähnliche Probleme, während er ein VR-System benutzt. Dies kann durch unterschiedliche Reize ausgelöst werden. 20, 21, 67, 75

Reynolds-Zahl Durch die Reynolds-Zahl kann unter anderem errechnet werden, ob ein turbulentes oder laminares Fließprofil im Medium unter gegebenen Umständen entsteht. Eine Zahl unterhalb von 2000 beschreibt ein laminares Fließbild, darüber beginnt das Fließprofil turbulent zu werden. [Stu] 5

Skeletal Mesh Ein 3D-Objekt, welches ein unsichtbares Skelett aus Knochen und Gelenken hat, dies kann dann animiert oder durch die Physik beeinflusst werden. 30, 48

Solocue Eine Software des Messgeräteherstellers zur Parametrierung des TFX-5000 Energy mittels eines Computers. 28, 29, 31, 34, 36, 45, 48, 51, 66, 68, 90

Struct Ein Datentyp, in dem ein Objekt durch Eigenschaften definiert werden kann. Bspw. Baum: Enum: Art, Double: Höhe, Integer: Alter ... diese Art der Definition erleichtert es, mehrere ähnliche Objekte zu verwalten und in Algorithmen zu verwenden. 44

Ultraschallsignal Eine Schallwelle, welche für Menschen nicht hörbar ist, da sie oberhalb von 20 kHz liegt. Fledermäuse beispielsweise können dieses Signal hören. 4

VR-Brille Eine Brille mit einem Bildschirm pro Auge, mithilfe derer 3D-Umgebungen für den Tragenden simuliert werden können. 8, 68, 77

Kapitel B **AKRONYME**

SUS Einige Fragen zur Benutzbarkeit eines Systems, entwickelt von John Brooke. Dieser Fragebogen wurde bereits validiert.[UPA] 64, 65, 72, 74–76, 91

VR Eine virtuelle 3D-Umgebung, in welche der Nutzer durch eine VR-Brille eintauchen und sich meist durch Bewegungen in der realen Welt mit dieser interagieren kann. Es wird unter anderem die Bewegung der Hände in die virtuelle Welt übertragen. 1, 2, 7–11, 18–20, 22, 24, 27–29, 33, 38, 62–65, 68, 69, 72, 74–80, 82, 83

LITERATUR

- [ala] Alfaomega et al. *Ultraschall-Durchflussmesser* – Wikipedia. (Abgerufen am 24/11/2024). URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Ultraschall-Durchflussmesser>.
- [alb] Magnus Manske et al. *Snelliussches Brechungsgesetz* – Wikipedia. (Abgerufen am 24/11/2024). URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Snelliussches%5C_Brechungsgesetz.
- [alc] Susanne Seyda et al. *IW-Trends 2/2024 IW-Weiterbildungserhebung 2023: Investitionsvolumen auf Höchststand*. URL: <https://www.iwkoeln.de/studien/susanne-seyda-sabine-koehne-finster-thomas-schleiermacher-investitionsvolumen-auf-hoehchststand.html>.
- [Bel20] Fahmi Bellalouna. „New Approach for Industrial Training Using Virtual Reality Technology“. In: *Procedia CIRP* 93 (2020). 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 2020, S. 262–267. ISSN: 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.008>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120305539>.
- [Ble22] Moritz Blecker. *Entwicklung eines mehrbenutzerfähigen Quelltexteditors für SEE*. (Abgerufen am 28/11/2024). Jan. 22. URL: https://www.szi.uni-bremen.de/wp-content/uploads/2022/07/Bachelorarbeit%5C_-Moritz-Blecker%5C_redfs-1.pdf.
- [Fra] unbekannt Fraunhofer Institut. *Weitere Usability-Fragebögen | Lab-IoT*. (Abgerufen am 24/11/2024). URL: https://websites.fraunhofer.de/Lab-IoT/?page%5C_id=1166.
- [Gie] Jörg Giebietz. *Pt100 Schaltung: wozu gibt es 2-Leiter, 3-Leiter und 4-Leiter?* (Abgerufen am 30/11/2024). URL: https://temperaturprofis.de/temperaturfuehler/pt100%5C_schaltung/.
- [Gmba] NMY Mixed-Reality Communication GmbH. *Contact NMY I Studio for VR and AR software*. (Abgerufen am 01/11/2024). URL: <https://www.nmy.de/>.
- [Gmbb] Northdocks GmbH. *Firefighter VR*. (Abgerufen am 06/11/2024). URL: <https://www.firefightervr.de/>.

-
- [Gmbc] Synaptikon GmbH. *Der Lerneffekt: Leistungssteigerung durch Wiederholung* | NeuroNation. (Abgerufen am 24/11/2024). URL: <https://www.neuronation.com/science/de/der-lerneffekt-leistungssteigerung-durch-wiederholung/>.
- [Hei24] Horst Gras Heinz G. Erb. *Durchflüsse Messen, regel dosieren, überwachen und registrieren*. 1. Ausgabe. (Abgerufen am 24/11/2024). Nürtinger Straße 7, 72369 Neuffen: Badger Meter Europa GmbH, 2024. ISBN: Auf Anfrage Badger Meter.
- [Inc] Badger Meter Inc. *Ultraschall-Durchflussmessgeräte* | Badger Meter. (Abgerufen am 24/11/2024). URL: <https://www.badgermeter.com/de-de/produkte/durchflussmessgeraete/ultraschall-durchflussmessgeraete/?bu=industrial>.
- [Joh17] DTE et al. Johnny J Moye Ph.D. *LearnBetterbyDoing_FourYearArticle-da625026.pdf*. (Abgerufen am 08/11/2024). Nov. 2017. URL: https://assets-002.noviams.com/novi-file-uploads/iteea/projects/LearnBetterbyDoing%5C_FourYearArticle-da625026.pdf.
- [Mar] H. Hermann Ehlers GmbH Marc Blecker. *Nützliche Information rund um den PT100 Ehlers*. (Abgerufen am 28/11/2024). URL: <https://www.ehlersgmbh.com/know-how/temperaturfuehler-fehlergrenzen-pt-100.php>.
- [Meta] Meta. *Künstliche Fortbewegungsarten* | Meta Horizon OS Developers. (Abgerufen am 8/11/2024). URL: https://developers.meta.com/horizon/resources/artificial-locomotion?locale=de_DE.
- [Metb] Meta. *Meta Quest 3S: Neues Mixed-Reality-Headset* | Meta Store. (Abgerufen am 19/11/2024). URL: <https://www.meta.com/de/quest/quest-3s/>.
- [Möl04] Kornelia Möller. *Verstehen durch Handeln beim Lernen naturwissenschaftlicher und technikbezogener Sachverhalte*. (Abgerufen am 20/8/2024). 2004. URL: https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/didaktik%5C_des%5C_sachunterrichts/dokumente/literaturmoeller/verstehendurchhandelnbeimlernen.pdf.
- [Mor+20] N. Morozova u. a. „On the feasibility of affordable high-fidelity CFD simulations for indoor environment design and control“. In: *Building and Environment* 184 (2020). (Abgerufen am 24/11/2024), S. 107144. ISSN: 0360-1323. DOI: <https://doi.org/10.1016/>

-
- j.buildenv.2020.107144. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132320305187>.
- [Mor18] Gerd Morgenschweis. *Hydrometrie, Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen*. 2. Auflage. (Abgerufen am 24/11/2024). Heidelberg Platz 3, 14197 Berlin, Germany: Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2018. ISBN: 978-3-662-55313-8. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55314-5>.
- [Mor22] H. Hermann Ehlers GmbH Moritz Blecker. *Tutorial zur Inbetriebnahme des TFX 5000 Ehlers*. (Abgerufen am 24/11/2024). 2022. URL: <https://www.ehlersgmbh.com/know-how/badger-tfx-5000-how-to-support-information-clamp-on-ultraschall.php>.
- [Oka23] Aditya Ajay Oka. *Mitigating VR Cybersickness Caused by Continuous Joystick Movement*. (Abgerufen am 8/11/2024). Juli 2023. URL: https://hammer.purdue.edu/articles/thesis/Mitigating_VR_Cybersickness_Caused_by_Continuous_Joystick_Movement/23668833?file=41542941.
- [Rau] Matthias Rauer. *Quantitative Usability-Analysen mit der System Usability Scale (SUS)*. (Abgerufen am 8/11/2024). URL: <https://seibert.group/blog/2011/04/11/usability-analysen-system-usability-scale-sus/>.
- [Sco+24] D. Scorgie u. a. „Virtual reality for safety training: A systematic literature review and meta-analysis“. In: *Safety Science* 171 (2024). (Abgerufen am 01/11/2024), S. 106372. ISSN: 0925-7535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106372>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753523003144>.
- [SD23] Paweł Strojny und Natalia Dużmańska-Misiarczyk. „Measuring the effectiveness of virtual training: A systematic review“. In: *Computers & Education: X Reality* 2 (2023). (Abgerufen am 01/11/2024), S. 100006. ISSN: 2949-6780. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cexr.2022.100006>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S294967802200006X>.
- [Stu] Studyflix. *Impulssatz: Definition, Herleitung, Berechnung · [mit Video]*. (Abgerufen am 8/11/2024). URL: <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/dynamik-von-fluiden-impulssatz-326>.

Abbildungsverzeichnis

- [UPA] German UPA. *SUS – System Usability Scale*. ((Abgerufen am 24/11/2024). URL: <https://germanupa.de/wissen/fragebogenmatrix/sus>).
- [Wag] Armin Wagner. *Pt100 / Pt1000 vs Thermoelemente* | TMH GmbH. (Abgerufen am 28/11/2024). URL: <https://www.temperaturmesstechnik.de/de/service/pt100-pt1000-vs-thermoelemente.html>.
- [ZDH22] Bitkom Research ZDH. *Handwerk: Einsatz von digitalen Anwendungen* | Statista. (Abgerufen am 19/11/2024). Juli 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/681835/umfrage/einsatz-von-digitalen-anwendungen-in-handwerksbetrieben-in-deutschland/>.
- [Zür] Universität Bern und Zürich. *Brechung* | *Interaktion der Schallwellen mit der Materie* | *Ultraschall* | *Allgemeine Radiologie* | *RadioSurfVet*. (Abgerufen am 9/11/2024). URL: <https://www.vetsuisse.iml.unibe.ch/radiosurfvet/allgemeine-radiologie/ultraschall/interaktion-der-schallwellen-mit-der-materie/brechung-2>.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1	Der TFX-5000 Energy Messwertumformer.	3
2	Der Ultraschallsensor und die Temperaturfühler an zwei Rohrleitungen montiert.	4
3	Eine Skizze der Schallausbreitung des Signals im Rohr. Die Pfeile repräsentieren die Fließgeschwindigkeit, je länger der Pfeil, desto höher die Geschwindigkeit. Dies ist ein rotationssymmetrisches, turbulentes Strömungsprofil, mit einer Reynolds-Zahl > 2.300 , ideal zur Messung.	5
4	Verschiedene Montagearten für die Ultraschallsensoren.	6
5	Eine VR Interaktion aus der virtuellen Egoperspektive (links) und aus der Third-Person Perspektive in der physischen Welt (rechts).	8
6	Der Blueprint Graph zur intuitiven Funktionserstellung.	13
7	Der Unreal Editor, unten ist die Bibliothek zu sehen, in der Mitte die Szene, rechts am Rand ist eine Übersicht über die Objekte in der Szene und die Einstellungen des ausgewählten Objekts.	13
8	Ein Beispielobjekt, welches in die Hand genommen werden kann.	19
9	Ein Teleportvorgang.	21
10	Die Startumgebung, links im Bild, ist das Einführungsvideo, rechts im Bild das Übungsobjekt.	23
11	Der Messwertumformer, ein Teilnehmer kann hier vier Schrauben in den Ecken des Gehäuses lösen, um die Interaktion zu üben.	23
12	Die Rohrleitungsexponate.	24
13	Die Verwirbelungsvisualisierung, links inaktiv, rechts aktiviert.	24
14	Die Selektion eines Rohrsegments mit dem Laserpointer im zweiten Modul.	25
15	Ein Überblick über Modul drei. Im Hintergrund ist eine der Videoanleitungen zusehen.	26
16	Die Messung der Rohrparameter.	27
17	Die Kabelmontage.	28
18	Eine Selektion in Solocue. Im unteren Bereich ist das Zehnerfeld zu erkennen.	29
19	Die Ultraschallsensormontage auf einem vom Rost befreiten Rohr.	30
20	Die Montage des RTD 2 am heißen Vorlauf.	31
21	Ein gutes Ultraschallsensor Signal.	32

22	Die erste Informationsstation, die Texte an der Wand erklären die Fehler zu den Exponaten. Das Video erklärt die Situationen genauer.	33
23	Die Teststation zum Thema Signalunterbrechung.	34
24	Teststation 2. Falsche Temperaturmessung.	35
25	Teststation 3 - Negativer Durchfluss und Temperaturwert. . . .	35
26	Teststation 4 - Falscher Durchflusswert.	36
27	Teststation 5 - Signalauswertung.	37
28	Das Durchflusstartelement.	39
29	Ein Rohrsegment.	40
30	Links ein Doppel-Bogen mit drei Ebenen (3D-Bogen) und rechts ein Doppel-Bogen über zwei Ebenen (2-D-Bogen)	42
31	Skizze zur Berechnung des Sensorabstands.	46
32	Der TFX-5000 Messwertumformer, links die geschlossene Front, rechts offen. Mit montierten Kabelenden und Brücken.	47
33	Der DTTR-Sensor, im Bild vorne die Unterseite mit Koppelpaste, hinten die Seitenansicht.	49
34	Die Temperaturfühler, links mit Wärmeleitpaste.	49
35	Das Videoplayer Objekt.	50
36	Ein Druckknopf.	51
37	Der Laserpointer.	52
38	Das Wandstärkenmessgerät.	52
39	Der Messschieber.	53
40	Der Schraubendreher.	54
41	Die Ultraschallkoppelpaste (links) und die Wärmeleitpaste (rechts).	54
42	Der Schleifpapierblock.	55
43	Das USB-Kabel, links am Messwertumformer montiert, rechts einzeln.	55
44	Der Ferritkern, links nicht montiert, rechts am Ultraschallsensorkabel montiert.	56
45	Das Gestell ohne Rohre.	59
46	Das fertige Gestell mit montierter Rohrleitung.	60
47	Eine Impression aus der Rohrleitungskonstruktion.	61
48	Die gewählten Berufsgruppen der Teilnehmer.	70
49	Verteilung der Berufsgruppen auf die gewählten Antworten zur Erfahrung mit Messtechnik.	71
50	Die Erfahrung mit Durchflussmesstechnik aufgeteilt nach Berufsgruppen.	72
51	Die Verteilung des SUS-Scores.	73
52	Die Verteilung der Antworten auf die Fragen des SUS als Boxplot.	75

53	Die Antworten auf die Fragen zur Inbetriebnahme.	77
----	--	----

Kapitel C ANHANG

C.1 Hinweis zur Evaluationsauswertung

Die Rohdaten der Evaluation wurden mithilfe von Python-Scripts ausgewertet. Durch diese Scripts wurden etwa Tabellen und Grafiken automatisch erzeugt. Um die Erstellung dieser Scripte zu beschleunigen, wurde künstliche Intelligenz verwendet, genauer ChatGPT. Diese Scripte sind auf dem USB-Stick enthalten und einsehbar.

Die Auswertung und Interpretation der Grafiken und Tabellen sowie der errechneten Metriken wurde ohne Hilfe von KI durchgeführt.

C.2 Hinweis zur Inhaltsprüfung

Um dem Leser ein möglichst fehlerfreies Erlebnis in Bezug auf Rechtschreibung und Satzbau zu ermöglichen, wurden die Texte dieser Arbeit mit dem KI-Tool „LanguageTool“⁹ auf Fehler geprüft und teilweise optimiert. Die Texte wurden jedoch ohne Hilfe eines KI-Tools verfasst.

C.3 USB-Stick

Im Rahmen der gedruckten Version wurde zusätzlich ein USB-Stick mit folgendem Inhalt angehängt:

- TFX-VR-Schulung — als Lauffähiges Programm auf Meta Quest 3
- TFX 5000 Energy Anleitung — Anleitung zum Messgerät.
- TFX 5000 Energy Sensor Anleitung DTTR — Anleitung zur Sensormontage.
- TFX 5000 Energy Installationshilfe (Eigen Zusammenstellung)
- Questions-1 und Questions-2.csv — Die Rohdaten der Evaluationsfragebögen.
- Python-Auswertung — Die Scripte zur Erstellung der Graphen und Tabellen sowie Metriken.
- Fragebogen.exe — Der erste und zweite Teil des Fragebogens als ein auf Windows ausführbares Programm.
- Bilder — Alle Bilder aus dieser Masterarbeit in Originalauflösung.
- Masterarbeit.pdf — Dieses Masterarbeit als PDF-Version

⁹<https://languagetool.org/de>