

Einsatz von Augmented Reality zur Abnahme und Qualitätssicherung auf Baustellen

AR-AQ-Bau

Ch. Schranz, H. Urban,
H. Kaufmann, Ch. Schönauer,
J. Rattenberger, P. O'Brien,
L. Ozeraitis, P. Jaritz

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

5/2022

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Interimistischer Leiter: DI Theodor Zillner

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in
dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik
Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Einsatz von Augmented Reality zur Abnahme und Qualitätssicherung auf Baustellen

AR-AQ-Bau

Associate Prof. DI Dr. Christian Schranz, DI Dr. Harald Urban
TU Wien, Zentrum Digitaler Bauprozess

Univ.Prof. Mag. Dr. Hannes Kaufmann, DI Dr. Christian Schönauer
TU Wien, Computer Graphics

Jürgen Rattenberger, DI Peter O'Brien
FCP

DI Linas Ozeraitis, DI Patrick Jaritz, MBA
ARIOT

Wien, März 2021

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Theodor Zillner

Interimistischer Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	6
2	Abstract	8
3	Ausgangslage	10
	3.1. Status Quo und Motivation	10
	3.2. Stand der Technik von Augmented Reality	11
	3.3. Forschungsfragen	15
4	Projekthalt	17
	4.1. Praxistauglichkeit: Anwendungs- und Anforderungsanalyse	17
	4.2. Closed-Loop-BIM-Exchange-Service	19
	4.3. BIM-AR-Interaction-System	19
	4.4. Baustellentaugliches AR System – Tracking und Interaktion	20
	4.5. Remote-Expert-System für eine AR-gestützte Fernabnahme von energierelevanten Systemen 21	
	4.6. Baustellen-Pilotprojekte (Evaluierung)	22
5	Ergebnisse	23
	5.1. Anwendungs- und Anforderungsanalyse	23
	5.2. Closed-Loop-BIM-Exchange-Service	28
	5.3. BIM-AR-Interaction-System	30
	5.3.1. Laden des BIM-Modells	30
	5.3.2. Synchronisation von physischer und virtueller Umgebung	30
	5.3.3. Interaktion in der AR-Brille	33
	5.4. Baustellentaugliches Trackingsystem	34
	5.5. Remote-Expert-System	39
	5.5.1. Interaktionsmöglichkeiten	42
	5.5.2. Interaktion zur Mängelbehebung mittels Change Detection	44
	5.5.3. Tests des Remote-Expert-Systems von ExpertInnen	44
	5.6. Baustellenversuche	46
	5.7. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“	50
6	Schlussfolgerungen	52
	6.1. Erkenntnisse	52
	6.2. Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten	53
7	Ausblick und Empfehlungen	54
8	Verzeichnisse	55

1 Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Die Bauwirtschaft gehört bis dato zu den am wenigsten von der Digitalisierung erfassten Wirtschaftszweigen. Derzeit erfolgen die Baufortschrittsermittlung, die Funktionsüberprüfung und die Bestandsaufnahme meistens noch immer händisch. Als spezieller Fall ist die Haustechnik (HKLS) im Bauwerk zu sehen; sie wurde immer komplexer und ist für bis zu 35 % der Baukosten verantwortlich. Mit dem zunehmenden Einsatz von Building Information Modeling (BIM) folgen auch (langsamer) andere Technologien, wie Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR), Künstliche Intelligenz (KI) etc. (unter Construction 4.0 zusammengefasst). In vielen Studien wird schon der mögliche Mehrwert des Einsatzes von AR hervorgehoben. Das AR-AQ-Bau Projekt fokussiert sich daher auf die Abnahme und Fernunterstützung von HKLS-Systemen mit Hilfe von Augmented Reality.

Für einen breitflächigen Einsatz von AR auf Baustellen herrschte bei den verfügbaren AR-Systemen im Jahr 2018 Forschungsbedarf. Dafür gab es einige Gründe. Damals konnten Daten vom BIM-Modell ins AR-Modell übertragen werden, nicht jedoch wieder zurück. Dies ist besonders für die Qualitäts- und Fortschrittskontrolle wichtig. Die Bedingungen auf Baustellen (Sonneneinstrahlung, Staub, gleichfarbige Oberflächen mit wenigen Erkennungsmerkmalen) erschweren die genauere Lokalisierung der Position (Tracking) der AR-Brille sowie des virtuellen AR-Modells über längere Strecken. Es gibt noch wenige auf das Bauwesen spezialisierte Benutzeroberflächen – und diese nur für Tablets und nicht für AR-Brillen, die für den Baustelleneinsatz aufgrund ihrer für diesen Zweck besseren Bedienbarkeit geeigneter sind.

Inhalte und Zielsetzung

Das AR-AQ-Bau-Projekt entwickelte ein fortschrittliches AR-System für die Abnahme von HKLS-Systemen im Bereich der Haustechnik. Im Bauwesen ist das BIM-Modell das zentrale Datenmodell; alle Informationen des BIM-Modells sollen für sämtliche am Bau Beteiligten zur Verfügung stehen und erstmalig in einem Closed-Loop-Ansatz durchgehend aktuell gehalten werden. Durch diese sog. „Closed-Loop-Datenkommunikation“ können auf der Baustelle Baufortschritte und Bestandsaufnahmen im AR-Modell gekennzeichnet und damit aktuell gehalten werden. Das Projekt fokussierte dabei auf Interaktionsmöglichkeiten, um Kommentare, Bilder sowie neue Bauteilinformationen ins AR-Modell zu übertragen und dann ins BIM-Modell zurückzuspielen („closed-loop“) mittels eines AR-Abnahme-Prototypen. Dadurch sind diese Informationen für alle am Bau Beteiligten jederzeit verfügbar. Mit einem Remote-Expert-System können externe Experten:innen zur Unterstützung der Ausführungskontrolle zugeschaltet werden und holografische Elemente (3D-Elemente, Bilder, Markierung) erstellen. Diese Funktionen führen zur Qualitätssteigerung der fertiggestellten Bauwerke, da Fehler erkannt und gemeinsam bearbeitet werden können. Die Personen müssen dabei nicht alle vor Ort sein. Während die erste Positionierung des AR-Modells auch auf Baustellen recht gut funktioniert, stellt das zuverlässige Tracking der AR-Brille sowie des AR-Modells im Baustellenumfeld eine weitere Herausforderung dar. Die derzeit vorhandenen Trackingsysteme kommen mit den schwierigen Verhältnissen auf Baustellen nicht zurecht und müssen daher entsprechend angepasst werden.

Methodische Vorgehensweise

Im ersten Schritt erfolgte eine Anwendungs- und Anforderungsanalyse von Augmented Reality in den Phasen Planen, Bauen und Betreiben – mit dem Schwerpunkt in der Phase Bauen. Anschließend ermittelte das Projektteam mit Unterstützung weiterer Expert:innen die notwendigen Anforderungen an Werkzeuge, Tracking, Layouts und Workflows für die HKLS-Abnahme bzw. für das Remote-Expert-System. Das Projektteam implementierte diese im nächsten Schritt in das AR-Qualitätssicherungstool. Bauexpert:innen (z.B. örtliche Bauaufsicht, Fachplaner:innen, Studierende) testeten sämtliche Entwicklungen (u.a. Datenaustausch, Tracking, Remote-Expert-System, Layouts) praxisnah in Labors sowie auf Baustellen (u.a. Future Art Lab und U-Bahn-Station „An den alten Schanzen“). Dabei evaluierte das Projektteam unter anderem die Baustellentauglichkeit, die Genauigkeit des Trackingsystems, die Einrichtungsdauer des AR-Modells, die Veränderung der Dokumentation, die Nutzerzufriedenheit, eine mögliche Steigerung der Qualität und der Energieeffizienz von Gebäuden auf der Baustelle. Die Ergebnisse flossen wiederum in eine Weiterentwicklung der Software des AR-Tools ein. Das Projekt vereinte hierbei Forschungsexpertisen aus Baubetrieb, AR, BIM-Modellierung sowie internationale Ingenieurserfahrung.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Anwendungsanalyse zeigen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von AR im Baustellenkontext, wobei die Expert:innen sehr hohes Potential bei der Baukontrolle und Mängelaufnahme sehen. Zusätzliches Interesse riefen die Anzeigemöglichkeit von Bauteilinformationen sowie von Kollisionen mit noch zu installierenden Bauteilen inkl. Wartungsraum hervor. Das Projektteam entwickelte einen optimierten Menüpfad für die Benutzeroberfläche zur Eingabe von Mängeln im HKLS-System. Die entwickelte Mängelklassifizierung basiert auf den wichtigen IFC-Klassen und fügt sich ideal ins BIM-Modell ein. Der umgesetzte Closed-Loop-BIM-Exchange-Service erlaubt die Rückspielung von Daten sowohl ins BIM-Modell als auch in eine Facility-Management-Datenbank und unterstützt somit den Bauwerksbetrieb. Die Untersuchungen der neu entwickelten Tracking-Methoden im realen Baustellenumfeld zeigten wesentliche Verbesserungen in der Lokalisierung der AR-Brille und des AR-Modells bei weiten Bewegungen im Raum. Dies ermöglicht den Einsatz in vielen Baustellensituationen. Das entwickelte Remote-Expert-System zur AR-Kommunikation zwischen Baustelle und *Remote Experts* konnte um wesentliche Funktionen erweitert werden. Dies betrifft vor allem die Interaktionsmöglichkeiten. Eine wesentliche Grundvoraussetzung für den Einsatz des Remote-Expert-Systems stellt eine stabile und sehr gute Internetverbindung dar. Bei Baustellen ist dies leider immer noch nicht in allen Bereichen der Baustelle gegeben. Hier kam es in den Baustellentests dann zu Abbrüchen der Kommunikation und Interaktion. Für den zufriedenstellenden Einsatz des AR-Remote-Expert-Systems ist hier noch Entwicklungsbedarf in der Netzwerktechnologie gegeben.

Augmented Reality ist eine Technologie, die die Vorteile des Einsatzes von BIM auf die Baustelle bringen kann. Viele Prozesse können vereinfacht und optimiert werden. Das in diesem Projekt entwickelte fortschrittliche AR-System für die Abnahme von HKLS-Systemen im Bereich der Haustechnik ist hierzu ein wichtiger Schritt. Weitere Entwicklungen aufbauend auf diesem System können den breitflächigen Einsatz von AR im Bauwesen vorantreiben. Neben den prognostizierten Einsparungen an Schadstoffen durch die Vermeidung nicht mehr notwendiger Fahrten auf die Baustelle zeigten sich während der COVID-19-Pandemie weitere Vorteile im Einsatz von AR. Das Remote-Expert-System erlaubt die Zuschaltung von Expert:innen aus der Ferne, weshalb bei Inspektionen vor Ort weniger Personal direkt auf der Baustelle notwendig ist und Anreisen reduziert werden können.

2 Abstract

Starting point / Motivation

To date, the construction industry has been one of the sectors least affected by digitization. At present, construction progress control, function checks, and inventories are mostly still carried out manually. A special case is building services (HVAC) in construction; it has become increasingly complex and is responsible for up to 35 % of construction costs. With the increasing use of Building Information Modeling (BIM), other technologies are following (step by step), such as augmented reality (AR), virtual reality (VR), artificial intelligence (AI), etc. (also called Construction 4.0). Many studies already highlight the potential added value of using AR. Therefore, the project AR-AQ-Bau focuses on the acceptance control and remote support of HVAC systems using augmented reality.

For widespread use of AR on construction sites, there was a need for research among the available AR systems in 2018. There were a few reasons for this. At that time, data could be transferred from the BIM model to the AR model, but not back again. This is especially important for quality and progress control. Conditions on construction sites (sunlight, dust, same-colored surfaces with few recognition features) make it difficult to locate the position (tracking) of the AR glasses as well as the virtual AR model more accurately over longer distances. There are still few user interfaces specialized for construction – and these only for tablets and not for AR glasses, which are more suitable for construction site use due to their better usability for this purpose.

Contents and goals

The project AR-AQ-Bau is developing an advanced AR system for the acceptance control of HVAC systems in the field of building services. In construction, the BIM model is the central data model; all information of the BIM model should be available for all parties involved in the construction process and, for the first time, be kept continuously up-to-date in a closed-loop approach. This so-called “closed-loop data communication” enables construction progress and as-built inventories to be marked in the AR model on the construction site and, thus, kept up to date. The project focuses on interaction options for transferring comments, images, and new component information to the AR model and then feeding them back into the BIM model (“closed-loop”). As a result, this information is available to everyone involved in the construction process at all times. With a remote expert system, external experts can be connected to support the execution control and create holographic elements (3D elements, images, marking). These functions lead to an increase in the quality of the completed structures, as errors can be identified and worked on together. The people do not all have to be on construction site in the process. While initial positioning of the AR model works quite well on construction sites, reliable tracking of the AR glasses as well as the AR model in the construction site environment is another challenge. The tracking systems currently available cannot cope with the difficult conditions on construction sites and must therefore be adapted accordingly.

Methods

The first step was an application and requirements analysis of augmented reality in the design, construction, and operation phases – with a focus on the construction phase. Then, with the support of experts, the project team determined the necessary requirements for tools, tracking, layouts, and workflows for HVAC acceptance control and for the remote expert system. The project team implemented these in the AR quality assurance tool in the next step. Construction experts (e.g., local

construction supervisors, technical planners, students) tested all developments (including data exchange, tracking, remote expert system, layouts) under practical conditions in laboratories and on construction sites (including the Future Art Lab and the subway station “An den alten Schanzen”). In the process, the project team evaluated, among other things, the suitability for construction sites, the accuracy of the tracking system, the setup time of the AR model, the change in documentation, user satisfaction, a possible increase in the quality and energy efficiency of buildings on the construction site. The results were again incorporated into a further development of the AR tool software. Here, the project combined research expertise from construction operations, AR, BIM modeling, and international engineering experience.

Results

The results of the application and requirement analysis show the wide range of possible uses of AR in the construction site context, with the experts seeing very high potential in construction inspection and defect recording. Additional interest was aroused by the possibility of displaying component information and collisions with components still to be installed, including maintenance space. The project team developed an optimized menu path for the user interface for entering defects in the HVAC system. The developed defect classification is based on the important IFC classes and fits ideally into the BIM model. The implemented closed-loop BIM exchange service allows data to be fed back into both the BIM model and a facility management database, thus supporting building operations. Investigations of the newly developed tracking methods in a real construction site environment showed significant improvements in the localization of the AR glasses and the AR model during long-distance movements. This enables the use in many construction site situations. The developed remote expert system for AR communication between construction site and remote experts could be extended by essential functions. This mainly concerns the interaction possibilities. An essential basic requirement for the use of the remote expert system is a stable and very good Internet connection. Unfortunately, this is still not the case in all areas of construction sites. Sometimes communication and interaction were interrupted in the construction site tests. For the satisfactory use of the AR remote expert system, there is still a need for development in the network technology.

Augmented reality is a technology that can bring the benefits of using BIM to the construction site. Many processes can be simplified and optimized. The advanced AR system developed in this project for the acceptance of HVAC systems in building services is an important step in this direction. Further developments based on this system can drive the widespread use of AR in construction. In addition to the pollutant savings predicted by eliminating the need for trips to the construction site, other benefits in the use of AR became apparent during the COVID-19 pandemic. The remote expert system allows experts to be connected remotely, which means that fewer personnel are needed directly at the construction site during on-site inspections and travel to the site can be reduced.

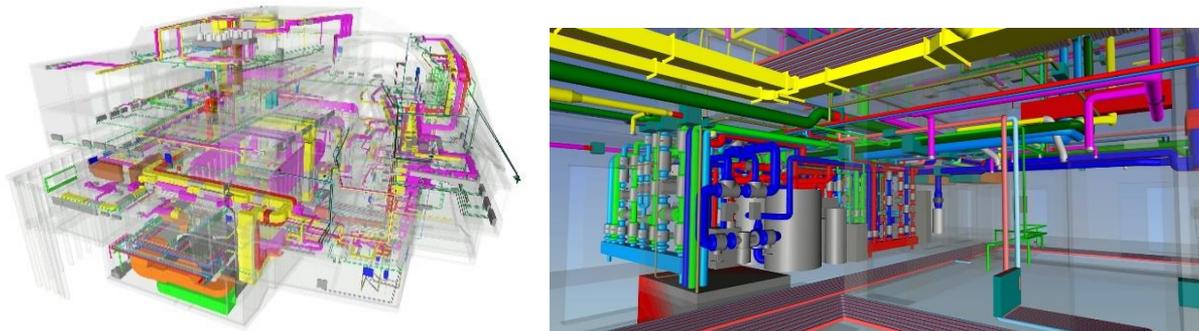
3 Ausgangslage

Dieses Kapitel beschreibt die Ausgangssituation für das Projekt AR-AQ-Bau. Es beginnt mit einer Einführung in den Status Quo sowie die Motivation, bevor der Stand der Technik für Augmented Reality im Bauwesen angeführt ist. Die sich daraus ergebenden Forschungsfragen schließen das Kapitel.

3.1. Status Quo und Motivation

Bis dato gehört die Bauwirtschaft (Baugewerbe und Bauindustrie) zu den am wenigsten von der Digitalisierung erfassten Wirtschaftszweigen (Accenture, 2016). Zwar nahm diese durch die Entwicklung und Einführung von BIM in den letzten Jahren zu, jedoch beschränkte sich diese vorwiegend auf die Planungsphase bei Großprojekten. Ein durchgängiger Einsatz von BIM zur Baustellenabwicklung konnte im Rahmen der österreichischen Studie „Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen“ (Goger et al., 2017) nicht festgestellt werden. Einer der wesentlichen Gründe ist, dass die Leistungsfortschrittsermittlung, die Funktionsüberprüfungen und die Bestandaufnahme auf der Baustelle meistens noch immer händisch durch Papierformular und E-Mailverkehr erfolgt. Als spezieller und schwieriger Fall ist die Haustechnik (HKLS) im Bauwerk zu sehen, die in den letzten Jahren immer komplexer wurde (siehe Abbildung 1) und bei Gebäuden schon bis zu 35 % der Baukosten ausmacht. Ein rechtzeitiges Erkennen von Fehlern in der Haustechnik wirkt sich somit sehr stark auf die Lebenszykluskosten aus.

Abbildung 1: Zwei Beispiele für die komplexe Haustechnik aus Pilotprojekten in BIM



Die Aufnahme des Leistungsfortschritts und die Kontrolle der Bauqualität erfolgt derzeit zum größten Teil durch händische Dokumentation während der Baustellenbegehung. Die erkannten Soll- und Ist-Unterschiede werden nachträglich auf den Computer in eine Excel-Liste und/oder ein Begehungsprotokoll übertragen und per E-Mail an den Vertragspartner geschickt. Auf der Baustelle kommen vereinzelt Softwareprogramme zum Einsatz, welche die händische Eingabe von Mängeln über ein Tablet auf einen 2D-PDF-Plan ermöglichen. Dabei sind die Hände auf der Baustelle durch das Tragen des Tablets blockiert, was die Aufnahme, die Verwendung von Wärmebildkameras und die schnelle Dokumentation erschwert. Baustellen-sicherheitstechnisch stellt diese Arbeitsweise zudem eine Gefährdung des Personals dar. Bei der Verwendung von BIM müssen die Problemfälle

anschließend vom 2D-Plan nochmals ins BIM-Modell (IFC-Format) mit der dazugehörigen Verortung eingetragen werden.

Treten bei der Kontrolle der Bauqualität der Haustechnik akute Probleme auf, sind meistens mehrere Gewerke betroffen. Nach derzeitigem Stand der Technik erfolgt die Kommunikation zwischen den Gewerken in der Regel durch Telefonieren oder Textnachrichten (Chats). In der Regel sind zur Lösung von Problemen mehrmalige Fahrten der verschiedenen Vertragsparteien zur Baustelle notwendig.

Die Kontrolle der Fabrikate der verbauten Komponenten stellt derzeit einen sehr hohen Arbeitsaufwand dar. Die Eingabe der technischen Daten der Fabrikate (z.B. Brandschutzklappe – Wartungsintervalle) werden derzeit nicht ins BIM-Modell zurückgespielt und stehen daher dem Facility Management (FM) nicht zur Verfügung. Das FM muss daher in der Betriebsphase die wartungsrelevanten Daten zeitaufwendig erfassen.

Den derzeitigen Ist-Zustand soll dieses Forschungsprojekt durch die Entwicklung eines baustellentauglichen Augmented Reality (AR)-System verbessern. Im nachfolgenden Abschnitt wird auf den Stand der Technik von Augmented Reality zum Zeitpunkt der Antragsstellung näher eingegangen.

3.2. Stand der Technik von Augmented Reality

Unter Augmented Reality (AR) ist eine computerunterstützte Wahrnehmung zu verstehen, wodurch die reale Welt um virtuelle Aspekte erweitert wird (Azumo et al., 2001). Zum Einsatz kommen meist Tablets und Smartphones sowie dezidierte AR-Brillen. Letztere bieten den Vorteil, dass die Hände frei bleiben und nicht durch das Halten und Bedienen des Tablets belegt sind. Dies ergibt eine wesentlich bessere Beweglichkeit und Sicherheit bei Verwendung von AR-Brillen. Daher bieten sich AR-Brillen verstärkt für den Einsatz auf der Baustelle an. Derzeit gibt es noch wenige AR-Brillen am Markt. Die Firma DAQRI entwickelte sowohl Hard- als auch Software für AR Technologien im industriellen Umfeld und bot mit den DAQRI Smart Glasses™ und dem DAQRI Smart Helmet™ zwei AR-Produkte an (Schutzbrille und Sicherheitshelm laut PPE Richtlinie, siehe Abbildung 2).

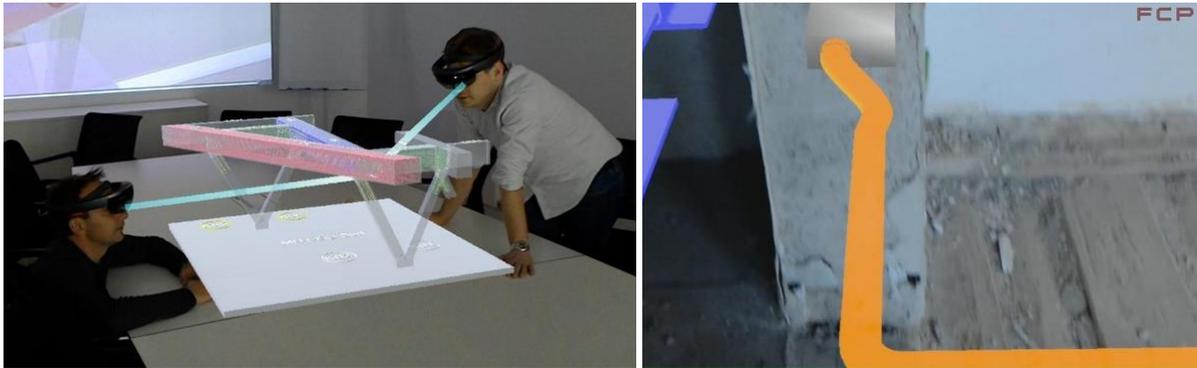
Abbildung 2: DAQRI Smart Glasses (li.), DAQRI Smart Helmet (re.) (DAQRI, 2020)



Neben diesen genannten Produkten gab es außer der Microsoft HoloLens 1 (Microsoft, 2019) kein anderes vergleichbares Gerät, das die Anforderungen im industriellen Umfeld erfüllt. Bei der HoloLens 1 und Meta 2 ist jedoch das Tragen eines Sicherheitshelms nicht möglich und daher sind diese für den Einsatz auf der Baustelle nicht geeignet.

Die bisherige Arbeit von FCP im Bereich AR im Bauwesen hat sich auf die synchronisierte Darstellung von Modellen zwischen zwei Geräten und die testweise optische Kollisionskontrolle auf der Baustelle ohne Datenaustausch konzentriert (siehe Abbildung 3).

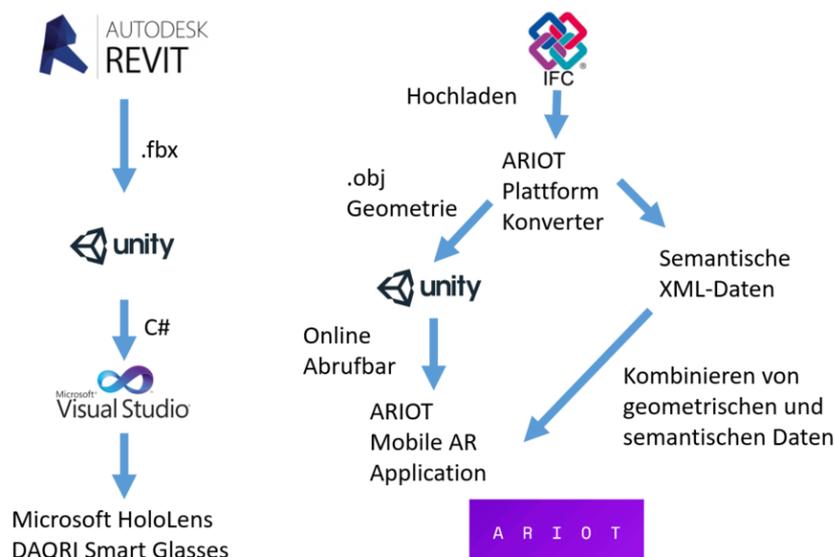
Abbildung 3: AR-synchronisierte Darstellung (li.), Kollisionskontrolle (re.) von der Firma FCP



Datenaustausch zwischen AR- und BIM-Modell

In diesem Projekt dient das BIM-Modell (bzw. Teile davon) (Eichler, 2021) als Grundlage für das AR-Modell. Daher ist der Datenaustausch zwischen Server und AR-Brille wichtig. In AR-AQ-Bau entwickelt die Fa. ARIOT den Datenaustausch weiter. Im ersten Schritt konzentrierte sich ARIOT auf die Konvertierung einer IFC-Datei für eine dreidimensionale Darstellung von BIM-Daten mittels WebGL (Khronos, 2018). Darauf aufbauend entwickelte ARIOT mittels Apple ARKit (Apple, 2018) eine mobile AR-Applikation zur Darstellung von BIM-Modellen auf Tablets – dies gewährleistet den Datenfluss von BIM-Modellen zu AR. Dabei wird der Datenfluss vom BIM-Modell in geometrische Daten und semantische Daten getrennt (siehe Abbildung 4). Im AR-Modell werden dem geometrischen Modell nur jene semantischen Daten hinzugefügt, die durch eine Interaktion ausgewählt werden. Dies steigert die Performance der AR-Darstellung stark (Das et al., 2015; Katranuschkov et al., 2003). Derzeit ist in allen existierenden Systemen der Datentransfer nur in eine Richtung möglich: vom BIM-Modell ins AR-Modell, nicht jedoch umgekehrt.

Abbildung 4: Derzeitiger Datenfluss „Dateneinbahn“ in Revit und Ariot



Bisherige Ansätze für den *Datenaustausch von BIM-Modellen* sind oft dateibasiert (CaddForce, 2018). Gezielte Veränderung von BIM-Modellen durch externe Schnittstellen (wie AR-Interfaces) waren nicht möglich. Dynamisches Teilen oder Zusammenführen von BIM-Modellen, Datenreplikation oder Integration von Funktionalitäten mittels Schnittstellen war ebenso nicht vorgesehen. Darüber hinaus berücksichtigen die bestehenden Entwicklungen keine Erfassung von Interaktionen, die direkte Änderungen im BIM-Modell induzieren. Eine wesentliche Anforderung an den baustellentauglichen Einsatz von BIM-Datenvisualisierungen ist die Effizienz der Datenübertragung. Die Nutzung datenintensiver Modelle kann deshalb problematisch werden. Bei bisherigen Ansätzen zur Teilung von BIM-Modellen (Das et al., 2015; Katranuschkov et al., 2003; Redmond und Smith, 2011) gehen aber oft BIM-Daten verloren oder werden für den jeweiligen Anwendungsfall nicht beachtet. Auch dadurch ist ein bidirektionaler Datentransfer (closed loop) derzeit nicht möglich. Dieser ist jedoch essentiell, um auf der Baustelle gewonnene Informationen wieder in das BIM-Modell zurückzuspielen.

BIM ermöglicht prinzipiell die Speicherung sämtlicher Daten aus der Planungs- und Ausführungsphase in einem gemeinsamen Gebäudemodell, welches dem Facility Management anschließend zur Verfügung steht. In der Planungsphase stehen jedoch noch nicht alle Daten zur Verfügung, d.h. es sind zwar z.B. HKLS-Bauteile im BIM-Modell eingetragen, nicht jedoch genaue Produktvorgaben (laut BVerGG nicht gestattet). Diese Produktdaten müssen nach Einbau händisch nachgetragen werden; dies ist kostspielig, fehleranfällig und meist nicht vollständig. Diese Daten sind jedoch für das Facility Management essentiell (z.B. Wartungsintervalle). Erst das vollständige Einspielen dieser Daten in das BIM-Modell entfaltet dessen großes Potenzial. Gerade die fehlende Vernetzung von Planen und Bauen einerseits und Betreiben andererseits ist ein wesentliches Manko der Baubranche bis dato.

Tracking für AR auf der Baustelle

Elementarer Bestandteil jedes AR-Systems ist das Tracking (Positionieren) der Kopfposition bzw. AR-Brille, damit virtuelle Inhalte an der richtigen Stelle gerendert werden können. In den letzten ca. zehn Jahren ist optisches inside-out-Tracking basierend auf natürlichen Features bzw. Keypoints durch die hohe Präzision zur etablierten Technologie in den meisten AR-Szenarien geworden. Dabei werden Features in der Textur der Umgebung in den Bildern einer RGB- oder Monochromkamera erkannt, zugeordnet und daraus die Kamerapose in sechs Freiheitsgraden bestimmt (Wagner et al., 2010; Forster et al., 2014). In der Regel handelt es sich dabei um einen „Simultaneous Localization and Mapping“ (SLAM)-Ansatz (Klein und Murray, 2007; Reitmayr et al., 2010), bei dem gleichzeitig mit der Berechnung der Pose eine 3D-Karte von Features der Umgebung erstellt wird. Neben dem integrierten System von DAQRI sind auch andere SLAM-Systeme von unterschiedlicher Qualität kommerziell verfügbar (z.B. Google ARCore, Apple ARKit). Mit der breiten Verfügbarkeit von günstigen Tiefenbildsensoren in den letzten Jahren wurden auch verschiedene SLAM-Ansätze basierend auf Tiefendaten entwickelt (Newcombe et al., 2011; Schönauer et al., 2013; Whelan et al., 2012). Die Genauigkeit und Robustheit dieser Systeme reduziert sich allerdings massiv, sobald der Sensor zu weit von den geometrischen Strukturen entfernt ist oder zu schnell bewegt wird (z.B. schnelle Kopffrotationen). Visuelle Trackingmethoden werden oft mit Beschleunigungssensoren, die in vielen Mobilgeräten zur Verfügung stehen, zu Hybridsystemen verbunden (Yang et al., 2017). Dabei werden entweder die Trackingdaten fusioniert, um die Genauigkeit und Robustheit zu verbessern, oder die Inertialdaten verwendet, um die Erkennung und Zuordnung der visuellen Features zu beschleunigen. Die Tests dieser Trackingsysteme finden derzeit nur in gut beleuchteten

Umgebungen mit viel visueller Textur statt, nicht jedoch auf Baustellen mit wesentlich komplexeren Umweltsituationen.

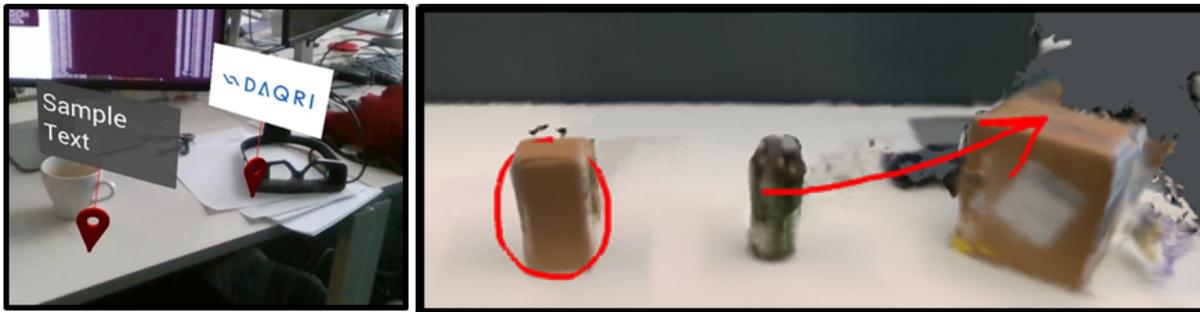
Jedoch gibt es noch *Probleme beim Trackingsystem*. Existierende Tracking-(SLAM-)Ansätze bauen die Map ausgehend vom Startpunkt der Benutzer:innen auf. Die Registrierung des virtuellen Modells im realen Koordinatensystem erfolgt in der Regel manuell – also benutzerzeitaufwändig und relativ ungenau. Gerade bei der gewünschten Anwendung, der Kontrolle von HKLS-Installationen, ergeben sich höhere Anforderungen an die Genauigkeit (akzeptabel: 5–10 cm). SLAM-Hybridsysteme liefern zwar gute relative Genauigkeit (Olson, 2011), durch die Akkumulation von Fehlern verschlechtert sich die absolute Präzision jedoch mit der Größe des Trackingbereichs. Das visuelle Tracking wird im Baustellenumfeld vor große Herausforderungen gestellt, da eine ausreichende Dichte an Features durch mangelnde Textur, viele einfarbige Beton- oder Verputzflächen, sowie eine gleichmäßige Ausleuchtung, z.B. durch einseitige Bauscheinwerferbeleuchtungen, nicht garantiert sind.

Kommunikation „Remote-Expert-System“

Eines der primären Anwendungsgebiete von AR ist die Kommunikation eines Teammitglieds mit AR-Brille am Ort des Geschehens mit entfernten Experten:innen (*Remote Experts*). Dementsprechend kann auf dem bereits existierenden Wissen aus der Maschinenbausperte aufgebaut werden (Lukosch et al., 2015; Chen et al., 2015). Der Vorteil von AR gegenüber traditioneller Video- und Audiokommunikation ist, dass die Expert:innen sich mittels der Daten aller Sensoren der AR-Brille sehr schnell einen Überblick der Lage vor Ort verschaffen und den lokalen AR-Anwendern zusätzliche Informationen und Anweisungen einblenden können. Um den Expert:innen einen guten Einblick in die lokale Umgebung zu ermöglichen und effizient mit den lokalen Benutzer:innen zu interagieren, ist es notwendig, die Umgebung des Teammitglieds zu rekonstruieren (Prisacariu et al., 2014; Mossel und Kroeter, 2016). Diese 3D-Rekonstruktionen können von Expert:innen aus der Ferne im AR-Modell bewegt und interagiert werden. Der derzeitige Entwicklungsstand des Remote-Expert-Systems bei DAQRI umfasst die 3D-Rekonstruktion der Umgebung lokaler Benutzer:innen sowie die Texturierung des 3D-Modells mit den Daten der Farb- und Wärmebildkamera (Schönauer et al., 2013).

Alle aufgezeichneten Sensordaten sowie die rekonstruierte Szene können mit den Expert:innen über das lokale WLAN geteilt werden. Darauf aufbauend gibt es Ansätze, um diese Rekonstruktion mit zusätzlichen Daten zu versehen, wie etwa Markierungen oder Zeichnungen (siehe Abbildung 5). Die Systeme wurden vor allem im Maschinenbau für standardisierte Arbeitsschritte getestet. Auf Baustellen herrschen jedoch wesentlich schwieriger Bedingungen vor (Umwelteinflüsse, Staub, kaum standardisierte Arbeitsschritte). Eine Entwicklung des Remote-Expert-Systems für dieses schwierige Umfeld ist eine große baupraktische Innovation.

Abbildung 5: Interaktionsmöglichkeiten für die Expert:innen (DAQRI – Projektpartner)



User-Interface samt AR-Remote-Expert-System

Anzeige-, Filter- und Interaktionsmöglichkeiten mit einem BIM-Modell in AR in der Baustellenumgebung zu nutzen, eröffnet eine Vielzahl von Vorteilen für alle im Bauprozess Beteiligten. Bisherige Ansätze beschränken sich auf die Ansicht von und sehr einfache Interaktionen mit 3D-Daten (Alsafouri und Ayer, 2017). Versuche mit BIM-Daten (Koch et al., 2012) decken derzeit keine Use-Cases für die Bauausführung ab. Daher sind die derzeitigen User-Interfaces noch nicht baustellentauglich.

Aktuelle AR-Remote-Expert-Systeme bieten die Möglichkeit, gewisse Mängel im 3D-Modell zu markieren und durch 2D-Zeichnungen einfache Anweisungen zu erstellen. Jedoch können diese einfachen 2D-Zeichnungen in einer 3D-Umgebung missverständlich sein. Mit den derzeit vorhandenen Werkzeugen können noch keine komplexen Anleitungen erzeugt werden, wie sie z.B. an der Baustelle zur Behebung eines HKLS-Mangels erforderlich sind. Intuitive Instruktionen mit Einbindung von 3D-Daten müssen derzeit unter großem Aufwand in externen Programmen entwickelt werden, um sie dann ins AR-System einzuspielen. Dies ist für den Baustelleneinsatz mit rasch erforderlichen Reaktionszeiten ungeeignet.

Die Feststellung von Mängeln und Baufortschritten soll durch eine robuste Vergleichsmöglichkeit erfolgen, die Veränderungen in allen vorhandenen Daten sowie der 3D-Rekonstruktion feststellt. Derzeit wird meist nur eine Art des Vergleichs verwendet (3D-Geometrie oder Kamerabild). Speziell im Baustellenbereich mit sich stark verändernder Umgebung und Lichtverhältnissen kann dies zu erheblichen Problemen führen.

3.3. Forschungsfragen

Im Fokus dieses Forschungsprojekts steht die Kontrolle der Bauqualität der Haustechnik während der Bauphase. Dies erfolgt derzeit hauptsächlich analog via Papierpläne oder (selten) digital mit 2D-Plänen. Dadurch werden Mängel, Änderungen oder auch die Leistungsfortschrittsaufnahme zuerst in die Papierpläne, die digitalen 2D-Pläne oder auch in Begehungsprotokolle eingetragen und müssten anschließend manuell ins BIM-Modell übertragen werden. Aufgrund des Arbeitsaufwands wird dies kaum durchgeführt. Hier entsteht an vielen Stellen ein redundanter, fehleranfälliger Arbeitsablauf. Besteht aufgrund von Ausführungsfehler der Bedarf nach zusätzlichen Expert:innenteams, sind weitere Besichtigungstermine dieser Expert:innenteams notwendig. Daher besteht die Arbeitszeit des operativen Bauleitungspersonals zu fast 50 % aus Besprechungen und Fahrzeiten (Chriti, 2015).

Der Einsatz einer AR-Brille mit einigen Zusatzfunktionen könnte diese Probleme lösen. Die Baukontrolle wird mit einer AR-Brille durchgeführt, auf der sich das digitale Modell des Bauwerks bzw. der Haustechnikanlage befindet. Die AR-Brille muss über ein baustellentaugliches Trackingsystem verfügen, damit das digitale Bild verlässlich mit dem realen Bauwerk überlagert werden kann. Die Mängel, Änderungen oder fertiggestellten Leistungen sollen im AR-Modell gekennzeichnet werden, wobei all diese auch kommentiert werden. Abschließend sollen all diese Daten in das BIM-Modell zurücktransferiert werden können, womit das ganze Potential von BIM ausgespielt werden könnte (von der Planung über die Bauphase bis in den Betrieb).

Keine der derzeit verfügbaren Brillen inkludiert alle erforderlichen Features in ausreichender Qualität. Manche Features müssten weiterentwickelt, andere wiederum erst entwickelt und in die AR-Brille integriert werden. Daher besteht Forschungsbedarf an folgenden Features:

- Baustellentaugliches Trackingsystem,
- Baustellentaugliches User-Interface mit Remote-Expert-System,
- Feststellung und Kennzeichnung der Mängel, des Baufortschritts und Einlesung von Bauteildaten mittel AR-Interaktion und
- Closed-loop-Datenverarbeitung / Datenkreislauf von BIM-Modell und AR-Modell.

4 Projektinhalt

Augmented Reality (AR) hat das Potential für einen umfassenden und vielfältigen Einsatz im Bauprozess. Dies gilt insbesondere für AR-Brillen. Die Ausgangslage zeigt jedoch auch, dass noch einige Fragen ungeklärt und einige Entwicklungen erforderlich sind. Dieses Projekt behandelt die zuvor angeführten Forschungsfragen in einzelnen Arbeitspaketen und darüber hinaus folgende Aspekte:

- Praxistauglichkeit: Anwendungs- und Anforderungsanalyse,
- Closed-Loop-BIM-Exchange-Service,
- BIM-AR-Interaction-System,
- Baustellentaugliches AR-System – Tracking und Interaktion,
- Remote Expert Funktionalität für eine AR gestützte Fernabnahme von energierelevanten Systemen sowie
- Baustellen-Pilotprojekte (Evaluierung).

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Vorgangsweise und angewandten Methoden dieser Arbeitsschritte.

4.1. Praxistauglichkeit: Anwendungs- und Anforderungsanalyse

Am Beginn erfolgte eine Anwendungs- und Anforderungsanalyse von AR in den Phasen Planen, Bauen und Betreiben– mit Schwerpunkt in der Phase Bauen und vor allem im Hinblick auf die Praxistauglichkeit. Ein Überblick über die möglichen Anwendungsfälle beschreibt deren Anforderungen an AR und zeigt die notwendigen Maßnahmen und erforderlichen Entwicklungen für die rasche wirtschaftliche Anwendung auf.

Das Forschungsteam wählte für die Durchführung der Anwendungs- und Anforderungsanalyse von AR im Bauwesen drei Ansatzpunkte. Zuerst fand eine Evaluierung anhand der derzeitigen Literatur statt. Die einschlägige Literatur zeigte, dass AR sinnvoll eingesetzt werden könnte, jedoch noch einige Entwicklungen erforderlich sind (Shin und Dunston, 2008; Wang und Love, 2012; Chi et al., 2013; Rankohi und Waugh, 2013; Wang et al., 2014; Li et al., 2017; Zhou et al., 2017; Urban et al., 2019; Fenais et al., 2020; Delgado et al., 2020). Anschließend ergänzten Expert:innen-Interviews und -Workshops die Erkenntnisse der Literaturstudie. Durch die gewählte Vorgangsweise wird sichergestellt, dass ein möglichst breites Spektrum der Erfahrungen der am Bauprozess Beteiligten in diesem Forschungsprojekt einfließt. Insgesamt wurden zehn Expert:innen-Interviews geführt. Der Fokus der Interviewpartner lag auf Unternehmen, welche in der Ausführung tätig sind: Porr, Strabag, Habau, Swietelsky, Doka, Hilti. Neben den im Bau tätigen Unternehmen wurden auch Forschungsinstitute und Softwareentwickler befragt: Codeflügel, WKO, FH Technikum Wien, TU Wien Geoinformation.

Die Workshops hatten das Ziel, die Ergebnisse aus den Interviews einer breiteren Masse an Fachleuten vorzustellen und dabei neue Anwendungsfälle zu evaluieren. Viele Expert:innen aus dem Bauwesen kennen die Funktionen und Möglichkeiten von der Technologie Augmented Reality kaum. Sämtliche Workshops waren daher in zwei Phasen aufgeteilt. Zuerst erfolgte die Präsentation der

Technologie AR vor dem gesamten eingeladenen Fachpublikum, damit die Personen einen Überblick erhalten. In der zweiten Phase besuchten kleinere Gruppen nacheinander verschiedene Stände, wo die Technologie anhand von Praxisbeispielen vorgezeigt wurde. Die kleineren Gruppen ermöglichten kreative Einzel- bzw. Kleinstgruppengespräche über mögliche Anwendungen von AR im Bauwesen. Die Workshops fanden mit folgenden Partnern statt:

- Ecoplus (Niederösterreichs Wirtschaftsagentur): Der Workshop „Augmented Reality – eine neue Dimension nutzen!“ fand mit KMUs im Oktober 2018 in St. Pölten statt.
- HABAU-Messe: Die Baufirma HABAU veranstaltete eine Informationsveranstaltung für die Polier:innen und Bauleiter:innen im Februar 2019.
- FCP-BIM-Day: Der Projektpartner FCP organisiert jährlich eine in der Baubranche etablierte BIM-Veranstaltung. Im Juni 2019 stellten die Autoren auch das Forschungsprojekt AR-AQ-Bau vor und diskutierten die Anforderung für den Einsatz von AR auf Baustellen.
- Firmenworkshop TU Wien: Im Oktober 2019 fand ein öffentlicher, von der TU Wien mit den Projektleitern (IBPM) veranstalteter Firmenworkshop mit interessierten Fachpartnern statt.

Die Anforderungsanalyse wurde mit Expert:innen der Projektpartner erweitert, um die spezifischen Anforderungen der weiteren Arbeitsschritte zu evaluieren.

Evaluierung eines AR-Qualitätssicherungstool für HKLSE

In enger Kooperation mit dem Planungsbüro FCP wurden die Bedürfnisse für ein AR-Qualitätssicherungstool für eine Baustellenabnahme am Beispiel der Gebäudetechnik (HKLSE) ermittelt. Die Ermittlung bestand aus drei Phasen. In der ersten Phase erfolgte eine Ermittlung des derzeitigen Datenflusses bzw. Workflows bei der Abnahme von HKLSE. Anschließend wurde die optimale Eingabe der Daten ins AR-Modell mittels Mockups und Menüpfaddarstellung ermittelt. In der letzten Phase erarbeitete das Forschungsteam die notwendige Struktur und Informationsdichte des AR-Modells (LOD), um die Anforderungen einer Qualitätskontrolle oder Abnahme zu erfüllen.

Ermittlung des derzeitigen Datenflusses bzw. Workflows bei der Abnahme von HKLSE

Der Ermittlung des derzeitigen HKLSE-Abnahme-Workflows dienten Interviews mit den entsprechenden Personen aus dem Planungsbüro FCP. Diese Expert:innen sind Mitarbeiter:innen, die in der Örtlichen Bauaufsicht (ÖBA) arbeiten und die Ausführung der Heizung-, Klima-, Lüftung-, Sanitär- (HKLS) oder Elektroinstallationen überwachen. Auf Basis dieser Interviews erfolgte die Erstellung von Prozessgrafiken der aktuellen Arbeitsabläufe im HKLSE-Abnahme-Prozess, welche in mehreren Zyklen durch die Interviewpartner verifiziert wurden.

Notwendige Struktur und Eingabe der Daten in das AR-Modell

Nach der detaillierten Analyse der oben angeführten Workflows und aus den Expert:innen-Interviews erhalten Informationen wurden im nächsten Schritt die Strategie (Bedürfnisse) und der Umfang (Funktionalität) ermittelt, anschließend die Struktur (Menüpfad) und Skelett/Oberfläche (Mockups) untersucht. Die Darstellungen wurden ähnlich wie bei der Workflow-Ermittlung mit den Interviewpartnern des Projektpartners FCP iterativ verbessert. Für die optimale Eingabe der Daten ins AR-Modell auf der Baustelle ist besonders die User-Experience wichtig. Die Untersuchung der User-Experience (UX) erfolgte entsprechend den UX-Vorgaben nach Garret (2010).

Für die Erfassung die Herstellerdaten von wartungsrelevanten Bauteilen (z.B. Brandschutzklappen) durch AR wurde folgende Herangehensweise ermittelt: Die Bauteile werden mit einem QR-Code versehen, der das Produkt und den Hersteller eindeutig identifiziert. Durch die Erfassung des QR-

Codes sind die Herstellerdaten in die AR-Brille geladen und sichtbar. Durch die Zuordnung dieser Daten zu einem ausgewählten Bauteil im AR-Modell werden die Daten mittels der IFC-GUID bauteilreferenziert in einer eigenen Projektdatenbank abgelegt. Die Ablage der Daten in einer eigenen Datenbank ermöglicht eine unbegrenzte Anzahl von Erfassungen von Herstellerdaten, ohne dass das BIM-Modell überladen wird. Eine Einschränkung der Übertragung der Herstellerdaten ist aus technischer Hinsicht daher nicht notwendig. Die Erfassung sämtlicher Bauteile mittels dieser Methode bedürfte eines sehr hohen Zeitaufwands. Daher sollte die Aufnahme der Daten nur bei rechtlich-, wartungs-, sicherheitsrelevanten Bauteilen durchgeführt werden. Im Zuge von Baustellentests wird dies für verschiedene Bauteile auf Baustellentauglichkeit getestet.

Evaluierung des Remote-Expert-Systems

Die Projektpartnern IBPM, DAQRI und FCP evaluierten mögliche Funktionen für das Remote-Expert-System. Anschließend entwickelte DAQRI einen Prototyp des Remote-Expert-Systems, welche von Projektpartner ARIOT für die HoloLens 2 weiterentwickelt wurde. Bei diesen Prototypen stand nicht die Funktionsfähigkeit auf der Baustelle im Vordergrund, sondern der Test der möglichen technischen Funktionen. Auf Basis der Evaluierung und des Tests des Prototypens wurde der Workflow für das Remote-Expert-System und notwendige Anforderungen und Funktionen (Werkzeuge) ermittelt und auf ihre Umsetzbarkeit überprüft.

4.2. Closed-Loop-BIM-Exchange-Service

Der Datenaustausch zwischen einem BIM-Modell und einer AR-Benutzeroberfläche muss bidirektional funktionieren. Bisherige Ansätze funktionieren nur in eine Richtung. In diesem Arbeitsabschnitt wird der OpenBIM-Standard IFC (ISO 16739) hinsichtlich eines bidirektionalen Datentransfers und Datenflusses zwischen BIM-Modellen und AR-Schnittstellen untersucht. Das Ergebnis ist eine technische Implementierung, welche die technische Grundlage für die weiteren Entwicklungen liefert. Mögliche Fehler oder Limitationen des IFC-Standards werden untersucht und zusammengefasst, um etwaige Maßnahmen zur Verbesserung zu empfehlen. Neben den Analysen beinhaltet dieses Arbeitspaket vor allem die Softwareentwicklung des Service.

4.3. BIM-AR-Interaction-System

Die Softwareentwicklung des BIM-AR-Interaction-Systems befasst sich mit der Einblendung und Bearbeitung von BIM-Daten in der realen Umgebung (auf Baustellen) mittels AR. Es interagiert mit dem zuvor entwickelten Closed-Loop-BIM-Exchange-Service.

Ziele sind

- die Auswertung und Beurteilung aktueller Ansätze BIM-Daten mittels AR darzustellen,
- die Erarbeitung eines AR-Oberflächenkonzeptes für BIM-Modelle,
- die Implementierung der Visualisierungen und Interaktionen sowie
- die Implementierung des bidirektionalen Datentransfers mit dem BIM Exchange Service.

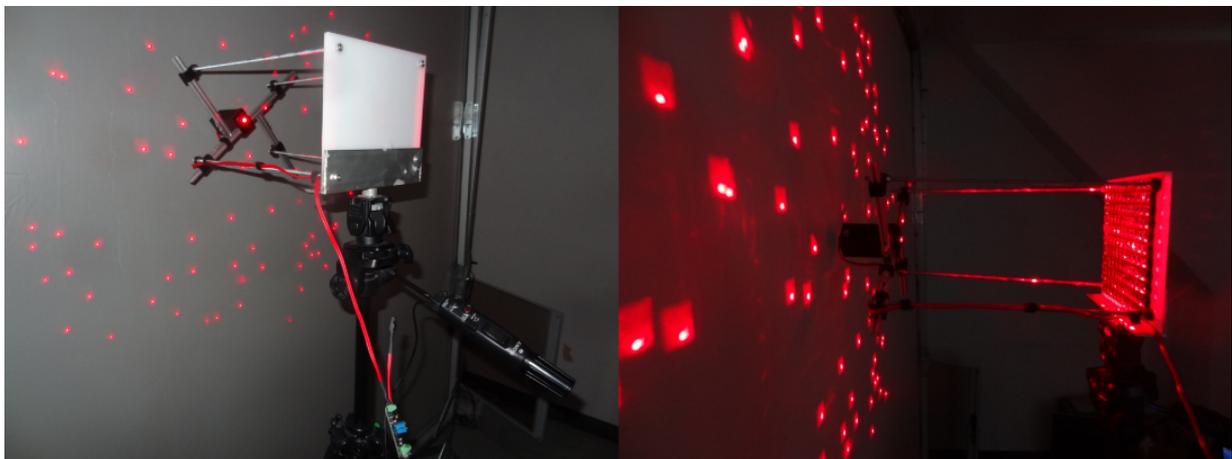
Das BIM-AR-Interaction-System kann BIM-Modelle mittels AR-Brille in der realen Umgebung anzeigen sowie Interaktionen durchführen. Dabei wird das BIM Exchange Service als BIM-Managementplattform verwendet, um BIM-Daten zu laden und Änderungen zu verwalten.

Herstellerdaten können mittels QR-Codes, die sich auf dem Bauelement befinden, ausgelesen, angezeigt und im BIM-Modell gespeichert werden. Um Mängel während der Abnahme zu protokollieren, wird der offene Standard BIM Collaboration Format (BCF) auf Feldtauglichkeit untersucht. Mittels einer 3D-Engine (z.B. Unity) werden Interaktionen mit der AR-Brille implementiert.

4.4. Baustellentaugliches AR System – Tracking und Interaktion

Baustellen bieten ein schwieriges Umfeld für ein auch auf Distanzen genaues Tracking (Positionieren) des AR-Modells z.B. durch Sonneinstrahlung, Staub oder sehr gleichfarbige Oberflächen. Für Situationen, in denen die in der AR-Brille integrierte SLAM-Lösung aufgrund mangelnder Textur oder Beleuchtung im Anwendungsumfeld zu wenig Features zur Verfügung stehen, entwickelt das Forschungsteam eine neuartige Trackingmodalität. Dabei werden auf untexturierten Flächen (idealerweise die Decke) mittels eines Lasers Features projiziert, die dann im Kamerabild erkannt werden und die Berechnung der 3D-Pose ermöglichen. Für den ausgewählten Ansatz verwendet das Forschungsteam den Laserprojektor (siehe Abbildung 6), der ein vordefiniertes Punktmuster projiziert. Zur Bestimmung der Pose der Kamera wird die Übereinstimmungen zwischen dem projizierten Muster und seiner perspektivischen Projektion im Kamerabild ermittelt. Die Berechnung der Pose erfolgt in der speziell dafür entwickelten Software, deren Algorithmen projektiv invariante Merkmale erkennt und entsprechend zuordnet.

Abbildung 6: Laserprojektions-Hardware bestehend aus Lasermodul und optischen Elementen



Die verwendeten Tracking-Methoden liefern bereits eine sehr gute relative Trackinggenauigkeit für die meisten Situationen. Zusätzlich besteht im Kontext des Anwendungsfalles der Vorteil, dass im BIM-Modell bereits Informationen über die 3D-Umgebung vorhanden sind. Durch eine entsprechende Erweiterung des SLAM-Algorithmus kann man beim Mapping Informationen aus dem BIM-Modell mit den Daten von RGB- und Tiefenbildkameras abgleichen und so die absolute Genauigkeit der Trackingdaten verbessern. Dazu wurde ein eigener Algorithmus entwickelt, der sowohl das BIM-Modell als auch das Mesh der rekonstruierten Szene analysiert und große planare Flächen (Wandelemente, Boden, Decke, Flächen größerer HKLS-Installationen etc.) identifiziert. Basierend auf Orientierung, Position und Größe der Flächen werden Korrespondenzen zwischen Flächen des BIM-Modells und der Szene gesucht und priorisiert. Basierend auf den Korrespondenzen

der Flächen wird dann die Tracking-Pose bzw. die Position und Orientierung des augmentierten BIM-Modells korrigiert. Das Matching der Flächen findet dabei primär im Nahbereich des Users statt. Dies erhöht einerseits die Effizienz der Methode und kompensiert besser den Drift des Trackings bzw. Skalierungsfehler in der globalen Rekonstruktion. Der Algorithmus ist primär als Korrektur der Pose konzipiert und benötigt daher als Startwert eine ungefähre User-Pose.

4.5. Remote-Expert-System für eine AR-gestützte Fernabnahme von energierelevanten Systemen

Mit dieser Softwareentwicklung wird ein AR-Remote-Expert-System im Baustellenumfeld zur Unterstützung der Fernabnahme erarbeitet und evaluiert. Das System soll eine Liveschaltung von entfernten Expert:innen (*Remote Experts*) in die AR-Brillen zur Überprüfung der Abnahme ermöglichen. Diesen *Remote Experts* wird dabei mittels aller verfügbarer Daten (Farb- und Wärmebild sowie 3D-Rekonstruktion der Szene) der Status vor Ort live vermittelt. Während der Abnahme können dabei Daten aus dem BIM Modell visualisiert werden.

Im ersten Schritt erfolgt die Anpassung der technischen Funktionalitäten des Remote Expert Systems an das schwierige Baustellenumfeld. Die bestehende Remote-Expert-System ist nicht für Baustellen ausgelegt. Anschließend werden die spezifischen Anforderungen eines Baustellenumfeldes ermittelt (beispielsweise Testen von Möglichkeiten für eine stabile Datenverbindung, Testen der Sensoren und des derzeitigen Tracking-Systems). Es wird eine Übermittlung aller Daten (Farbbildkamera sowie 3D-Rekonstruktion) der Baustelle an *Remote Experts* und einfache, erste Interaktionsmöglichkeiten getestet. Im nächsten Schritt folgt die Softwareentwicklung der Interaktionsmöglichkeiten der *Remote Experts*, um AR-Instruktionen und Annotierung zum räumlichen Modell sowie zum geladenen BIM-Modell in der AR-Brille hinzuzufügen. Diese Annotierungen können beispielsweise 3D-Pin-Markierungen mit Text- und Bild-Anmerkungen, Zeichnungen, Platzieren von 3D Modellen, Segmentierung von Teilen der Rekonstruktion zur besseren Visualisierung des Arbeitsablaufes etc. sein. Im dritten Schritt kommt das zuvor entwickelte Framework für das Zurückspielen in das BIM-Modell zum Einsatz. Dies dient dem Abgleich des derzeitigen Stands einer Baustelle mit dem BIM-Modell. Zusätzlich sollen von Expert:innen entdeckte (Bau-)Mängel wieder direkt in das BIM-Modell einspeisen können. Der vierte Schritt beschäftigt sich mit dem Erkennen von Veränderungen (Change Detection). Durch einen Abgleich mit alten/bestehenden Rekonstruktionen soll das System automatisch geometrische/bauliche Veränderungen und farbliche Veränderungen auf der Baustelle erkennen, diese visualisieren und so den Experten/die Expertin auf einen möglichen Mangel hinweisen. Für das automatische Erkennen von Veränderungen ist eine exakte Szenenrekonstruktion von essentieller Bedeutung. Deshalb ist jede Verbesserung des bestehenden Tracking-Systems und der Überlagerung zweier Szenen (Anchor Points) äußerst wertvoll. Im letzten Schritt erfolgen Tests des Systems auf Baustellen samt Feedbackerhebung (siehe weiter unten). Anhand dieser Feedbacks wird das System samt dem User-Interface laufend verbessert.

4.6. Baustellen-Pilotprojekte (Evaluierung)

In diesem Projektteil erfolgte die Überprüfung der Praxistauglichkeit der zuvor entwickelten Funktionen. Die Entwicklungen wurden in einem zyklischen Prozess auf der Baustelle getestet, evaluiert und optimiert. Abschließend wurde die Steigerung der Bauqualität und Energieeffizienz der Gebäude durch AR ermittelt.

Die für den Baustellenbetrieb entwickelten neuen AR-Funktionen für die Qualitätssicherung der Abnahme (HKLS) wurden zuerst in einem Laborraum getestet. Hier konnte im ersten Schritt unter gleichbleibenden Bedingungen die Funktionsweise getestet werden. Anschließend erfolgte die Einbindung in die Praxis auf der Baustelle in Pilotprojekten. Die Evaluierung der Praxistauglichkeit erfolgte im Probetrieb durch Sachverständige (FCP) mit wissenschaftlicher Begleitung. Zur Untersuchung der Verbesserung der Trackinggenauigkeit diente die *Scan*-Funktion (Erstellung einer 3D-Punktwolke) der DAQRI AR-Brille, da diese Funktion mit dem gleichen Tracking-System arbeitet wie zur Positionierung des AR-Bilds in der realen Umgebung. Der Vorteil bei der Verwendung von *Scan* ist jedoch, dass die Funktionsfähigkeit des Tracking-Systems besser bildlich dokumentiert werden kann. FCP koordinierte den möglichen Zugang zu den genannten Baustellen entsprechend der geeigneten Forschungsphasen. Die einzelnen Baustellen wurden während der gesamten Dauer des Forschungsprojekts laufend bewertet, um sicherzustellen, dass die Technologie in der für sie vorgesehenen Umgebung getestet werden kann. Die folgenden Baustellen wurden herangezogen:

- Autobahnmeisterei Bruck a.d. Leitha,
- Future Art Lab,
- Krankenhaus der Barmherzigen Brüder, Graz,
- Tiefgarage FCP, Wien und
- Baustelle U-Bahnstation U2 „An den alten Schanzen“.

5 Ergebnisse

Im Projekt AR-AQ-Bau entwickelte das Forschungsteam ein fortschrittliches, baustellentaugliches AR-System zur Abnahme und Qualitätskontrolle auf Baustellen. Dies bedurfte einiger einzelner Entwicklungen, die sich zu einem Ganzen fügen. Diese Entwicklungen können auch einzeln und für weitere Forschungsprojekte verwendet werden. Die Ergebnisse der einzelnen Entwicklungspakte werden im Folgenden dargestellt.

5.1. Anwendungs- und Anforderungsanalyse

Im Projekt erfolgte eine umfangreiche Anwendungs- und Anforderungsanalyse. Die Ergebnisse wurden in der Fachzeitschrift Bauingenieurwesen publiziert (Urban et al., 2019; Schranz et al., 2020).

Für die Entwicklung der AR-Systeme im Projekt ist der Abnahmeprozess der wichtigste Anwendungsfall. Daher wurde dieser für die Qualitätssicherung wichtige Prozess genauer analysiert, um festzustellen, wie der Prozess genau abläuft und welche Schritte durch AR verbessert werden können. Die laufende Qualitätssicherung (örtliche Begehung) stellt dabei den wichtigsten und zeitaufwändigsten Teil des Abnahmeprozesses dar. Jeder Mangel muss durch ÖBA-Mitarbeiter:innen gefunden bzw. so gekennzeichnet und beschrieben werden, dass Verantwortliche der jeweiligen Firma den Mangel ebenfalls identifizieren können. Tabelle 1 zeigt einen Auszug der qualitativen ermittelten, möglichen Verbesserung durch AR bei der Abnahme von HKLSE-Leistungen.

Tabelle 1: Mögliche Verbesserung bei der AR-HKLSE-Abnahme

Verbesserung durch AR	Derzeitige Problemstellung	Ziel des AR-Tools
Vielzahl von Plänen und Unterlagen	Aufgrund der Menge und des Detaillierungsgrades der Unterlagen ist der Vergleich zwischen Plänen und Bestand kompliziert.	Das AR-Tool ermöglicht die visuelle Überlagerung von Modellen (Übersichtspläne und Pläne aus Einzeldisziplinen) und Bestand direkt auf der Baustelle.
Abrufen von Elementinformationen	Informationen über die TGA-Elemente gehen bei der Plandarstellung verloren oder sind in eigenen Datenbanken zu suchen.	Die Informationen über jedes TGA-Element sind über das BIM-Model in IFC im AR-Tool theoretisch direkt zugänglich.
Kollisionen mit zu installierenden Elementen	Mögliche Kollisionen zwischen bereits installierten und noch nicht installierten Elementen sind derzeit schwer erkennbar (z.B. zwischen einem bestehenden Rohr und einem zu installierenden Zwischendeck).	Die Kollisionen zwischen bestehenden und zu installierenden Elementen können mit dem AR-Tool durch die Überlagerung des BIM-Modells mit der Realität identifiziert werden.

Verbesserung durch AR	Derzeitige Problemstellung	Ziel des AR-Tools
Lokalisierung der bereits festgestellten Mängel	Bei große Bauprojekten ist die Lokalisierung der bereits festgestellten Mängel schwer möglich.	Das AR-Tool kann die Position der bereits festgestellten Mängel durch eine Radarfunktion angeben und die AR-Nutzer:innen direkt zur Stelle führen.
Bestimmen des Aufnahmeortes von Fotos	Mit einer Kamera aufgenommene Fotos müssen manuell den Mängeln zugeordnet werden.	Jedes mit dem AR-Tool aufgenommene Foto kann automatisch einem Mangel zugeordnet werden
Wiederholende Mängel	Auf verschiedenen Baustellen wiederholen sich immer wieder die gleichen Mängel.	Das AR-Tool soll je nach Element eine Standardliste an Mängeln besitzen, um den Arbeitsaufwand der Benutzer:innen bei der Eingabe zu reduzieren.
Planänderungen	Die Pläne (insbesondere die Montagepläne) werden oft geändert. Es ist notwendig, immer den aktuellen Stand zu haben.	Durch eine Online-Plattform wird die aktuellste IFC-Version ins AR-Tool geladen und dargestellt, wodurch Fehler aufgrund älterer Versionen verhindert werden.
Manuelle Protokollerstellung	Wenn in der Firma keine Abnahme-Software verwendet wird, muss das Protokoll manuell erstellt werden (z.B. mithilfe von MS Word).	Das AR-Tool ermöglicht, dass sämtliche Mängel bauteilzugehörig und jederzeit online zugänglich sind. Eine Berichtigungs- und Verantwortungsstruktur ist ebenfalls möglich.
Hands-free	Die Nutzung von Mobilgeräte bei der Abnahme hat den Nachteil, dass die Hände durch die Bedienung des Gerätes belegt sind, dies führt zu einem erhöhten Unfallrisiko.	Durch die Verwendung einer AR-Head-Mounted-Device (AR-Brillen) sind die Hände auf der Baustelle frei.
Mängelerfassung	Der Prozess der laufenden Qualitätssicherung ist zeitaufwendig.	Das AR-Tool beschleunigt den Prozess durch Standard-Mängelklassifizierung, Kollisionskontrolle auf der Baustelle, Webzugriff usw.

Für eine bessere Abnahme und Qualitätskontrolle eingebauter HKLS-Systeme wurden aufgrund der Experten:innen-Interviews Mockups eines möglichen AR-Abnahmetools und ein verbesserter Menüpfad für dieses AR-Abnahmetool entwickelt (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8). Die dargestellten Abbildungen zeigen den theoretisch anhand der Interviews ermittelten Soll-Zustand für ein AR-Tool. Die evaluierten Funktionen wurden in einem späteren Arbeitspaket in das AR-Tool berücksichtigt und schrittweise auf Baustellentauglichkeit und User-Experience getestet werden.

Abbildung 7: Mockup der Dateneingabe im AR

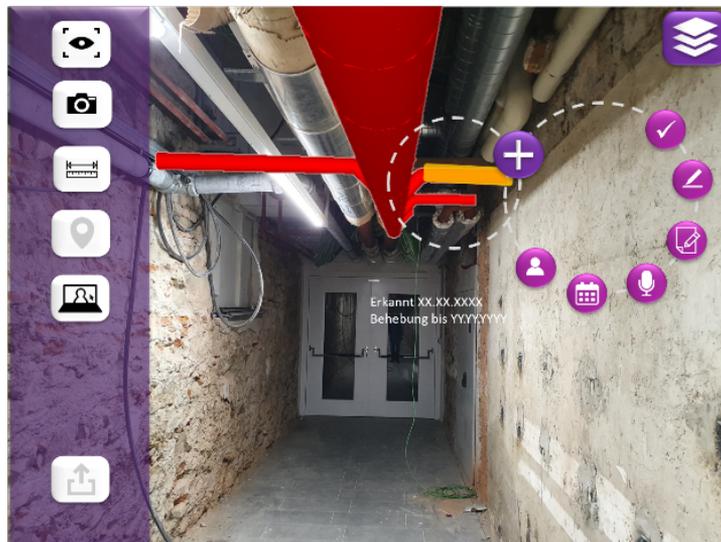
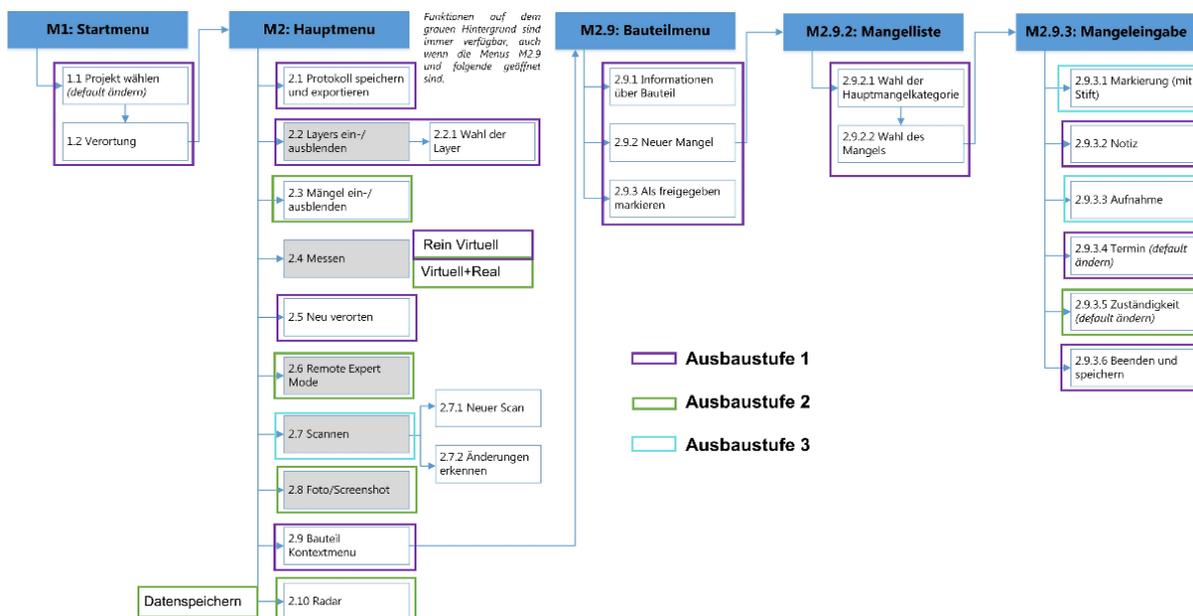
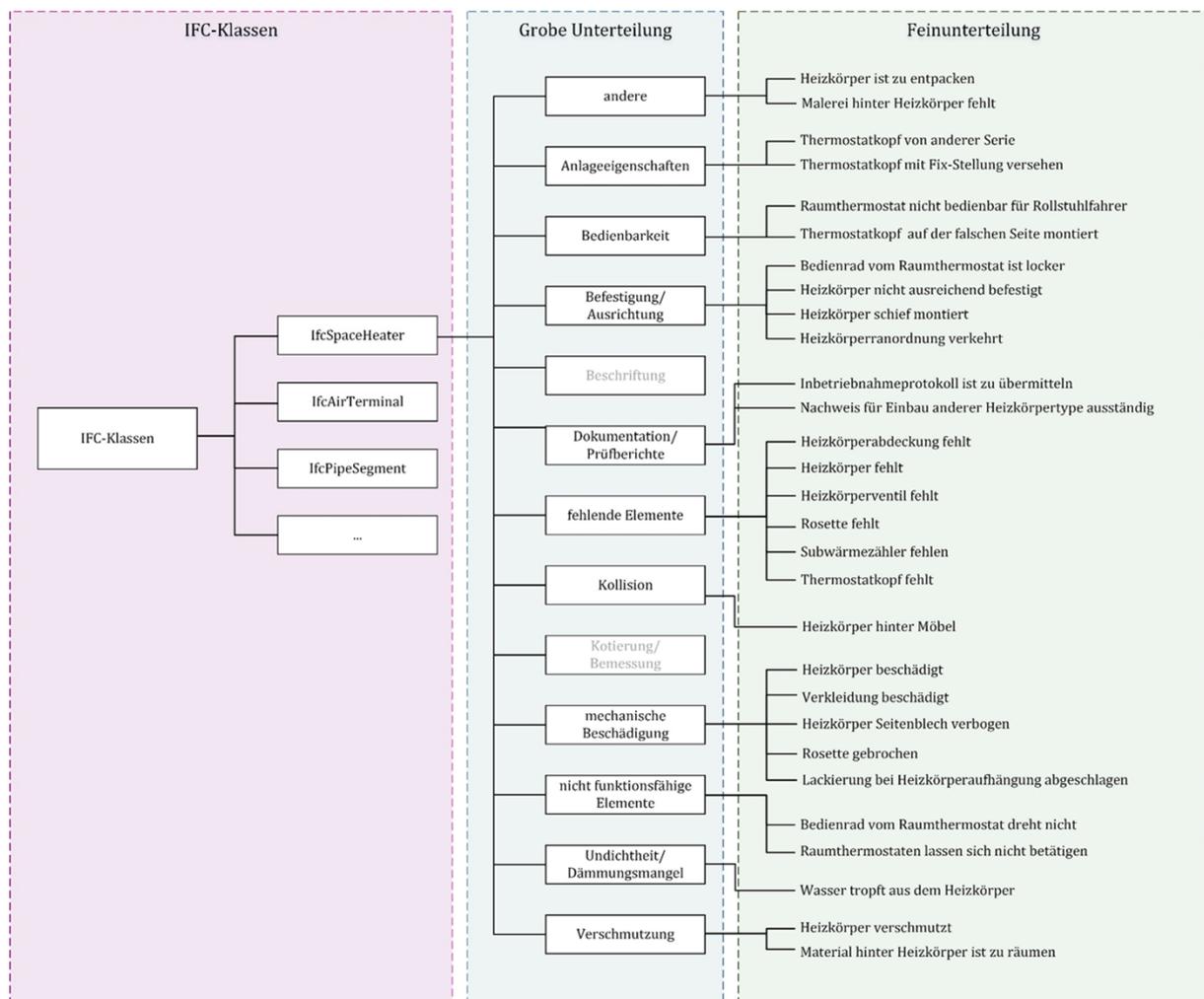


Abbildung 8: Entwickelter Menüpfad für das AR-Abnahmetool inkl. Priorisierung



Im Zuge der Evaluierung der optimalen Eingabe von Daten musste festgestellt werden, dass eine individuelle Eingabe jedes Mangels in der AR-Brille aufwendig und für die Baustelle unpraktisch ist. Der Mangel soll daher über eine vorgegebene Mängel-Liste erfolgen. Dazu erfolgte beispielhaft eine Mängelklassifizierung für die wichtigen IFC-Klassen. Die Basis bilden vom Forschungspartner zur Verfügung gestellte Mängellisten. Im ersten Schritt erfolgte die Einteilung aller TGA-Elemente in Klassen nach dem IFC-Standard (Eichler, 2021). Anschließend folgte für jede Klasse eine grobe Unterteilung in Mängelkategorien. Jede Mängelkategorie enthält schließlich eine Vielzahl an genauen Mängelbezeichnungen (Feinunterteilung), welche dem Bauteil zugeordnet werden können. Abbildung 9 zeigt die schematische Vorgehensweise der Mängeleingabe. Die zuvor beschriebenen Funktionen ermöglichen die Auswahl und Eingabe von Daten, welche anschließend in das BIM-Modell zurückgespielt werden müssen. Diese sollen mittels BCF-Datei über einen BIM-Server direkt in die Modelliersoftware der Planer übermittelt werden.

Abbildung 9: IFC-Mängelklassifizierung



Neben der Erarbeitung der notwendigen Features für die Mängelabnahme wurde eine Evaluierung der erforderlichen Funktionen für das Remote-Expert-System zusammen mit den Projektpartnern durchgeführt. Das Ergebnis ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Funktionen werden hinsichtlich ihrer Priorität und Umsetzbarkeit kategorisiert. Funktionen mit der Priorität 1 sind für einen baustellentauglichen Einsatz des Remote-Expert-System absolut notwendig. Priorität 3 hingegen bedeutet, dass das Feature sinnvoll ist, aber nicht unbedingt erforderlich. Die Umsetzbarkeit bewertet den arbeitstechnischen Aufwand für die Implementierung der Funktion im Remote-Expert-System (niedriger Aufwand 1, mittlerer Aufwand 2 und hoher Aufwand 3). Die Funktionen *holografische Markierungen*, *Videoübertragung/Bildschirmübertragung* und *Audioübertragung* bilden die Grundvoraussetzung für den praxisrelevanten Einsatz des Remote-Expert-Systems. Die Funktion *Scan – 3rd-Person* ist für die Baubranche von großer Bedeutung, da der *Remote Expert* einen deutlich besseren räumlichen Überblick erhält und so die AR-Nutzer:innen wesentlich besser als bei einer normalen Videoübertragung unterstützen kann. Aufgrund dieses Potenzial empfehlen die Projektpartner trotz der großen Herausforderung durch die hohe Datenrate die Aufnahme der Funktion in den baustelleneinsatzfähigen Prototypen. Die Ergebnisse dieser Analyse und die Überlegungen zum Workflow bei der Fernabnahme wurden in die Entwicklung des Remote-Expert-Systems übernommen.

Tabelle 2: Evaluierung erforderlicher Funktionen (Werkzeuge)

Schlagwort	Derzeitige Problemstellung	Priorität	Umsetzbarkeit
Videoübertragung	Die Videoübertragung ermöglicht eine Live-Übertragung der 1 st -Person-Sicht des AR-Nutzers zum Remote Expert.	1	2
Audioübertragung	Die Funktion ermöglicht den Audioaustausch.	1	2
Web-Interface	Der Remote Expert wird über einen Web-Browser am Computer mit dem AR-Nutzer verbunden.	1	2
Gruppengespräch	Die Funktion ermöglicht das Verbinden mit mehreren Remote Experts gleichzeitig	2	2
Benutzer-Einladung	Die Möglichkeit, sich über eine Auswahl von Personen direkt mit dem Experten zu verbinden.	1	2
Bildschirm-Teiler	Die Funktion ermöglicht das Teilen des Bildschirms vom Remote Expert mit dem AR-Nutzer.	1	1
Scan – 3rd-Person	Die Funktion erstellt Aufzeichnungen von geometrischen Daten, welche der Remote Expert am Bildschirm im 3rd-Person-Modus betrachten kann.	1	3
Markierungen	Die Funktion erstellt benutzerdefinierte Markierungen (Pfeile, Kreise etc.), welche im Raum (im Scan) verortet sind.	1	2
Tags	Die Funktion ermöglicht das Setzen von „Tags“ (Bilder oder Texte), die fix im Raum verortet werden.	2	2
Selektieren und Verschieben	Mittels der Funktion kann der Remote Expert geometrische Daten („Objekte“) auswählen und diese virtuell verschieben (AR), sodass der AR-Nutzer sieht, wo dieses Gerät eingesetzt werden soll.	3	2
Pause/Play	Die Pausenfunktion „friert“ das übertragene Bild ein. Der Remote Expert kann dann Notationen (Markierungen, Selektierungen) durchführen. Der AR-Nutzer kann sich inzwischen frei bewegen. Sobald die Play-Taste bedient wird, erscheint die Markierung auf der Brille.	3	2
Löschen – Objekte	Mit dieser Funktion erfolgt das Löschen der einzelnen zuvor erstellen virtuellen Elemente.	2	1
Löschen – Scan	Die Funktion löscht den zuvor erstellten Scan.	2	2
Nachträgliche Aufbereitung des Remote-Einsatzes	Diese Funktion ermöglicht die Erarbeitung neuer Schulungsvideos anhand aufgezeichneter Remote-Expert-Tätigkeiten.	3	3
Automatisches Abspielen von Inhalten – Machine Learning	Mit Hilfe von AI (Machine Learning) sollen Problemstellung erkannt werden und automatisch Schulungsvideos vorgeschlagen werden.	3	3

5.2. Closed-Loop-BIM-Exchange-Service

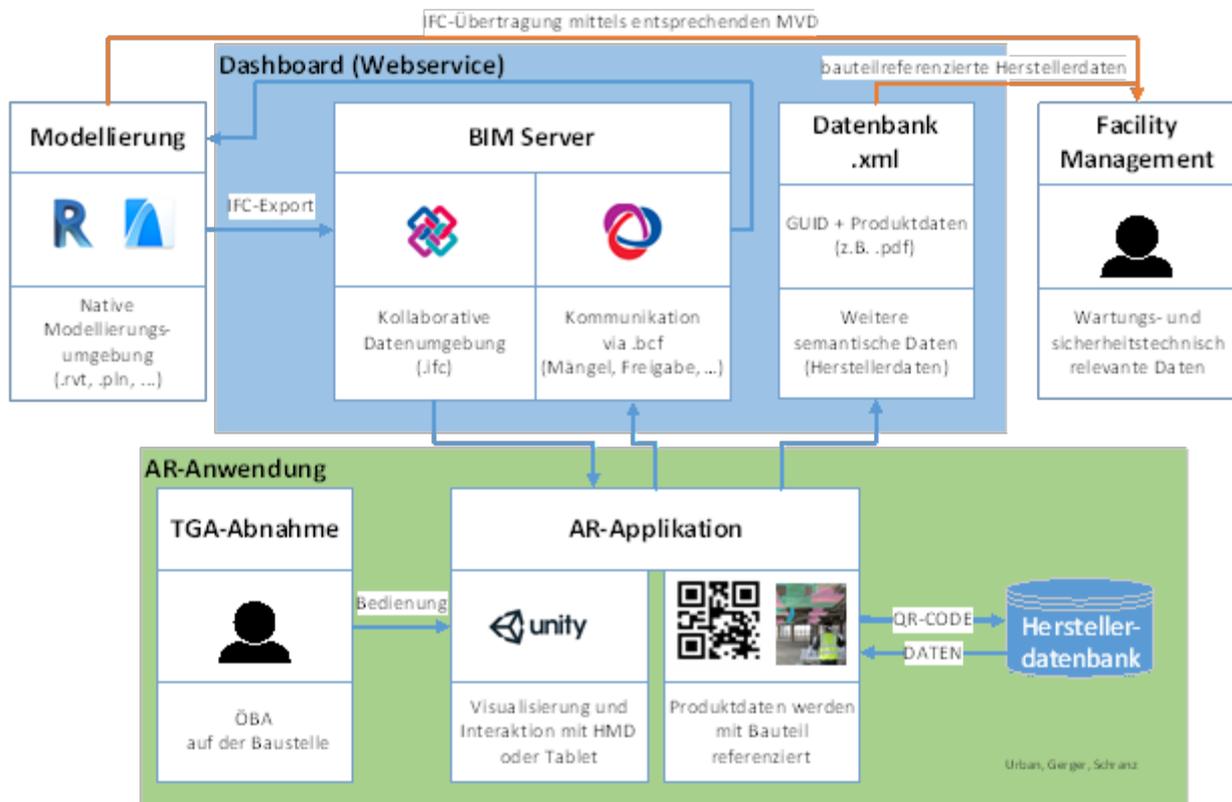
Eine Grundvoraussetzung für die rasche und einfache Rückführung der Daten ist das Closed-Loop-BIM-Exchange-Service. Grundlage für die Entwicklung bilden die erhobenen Anforderungen. Während der Vorbereitungsphase wurden mehrere Softwarepakete evaluiert und schlussendlich wurden folgende Produkte anfangs als Kern-Software-Stack verwendet: Ubuntu (Version 19.04) als Betriebssystem (nach der Umstellung auf die HoloLens wurde das MixedRealityToolkit-Unity verwendet), BIMserver (Version 1.5.125) als Java-basierter Open Source Server zur Abdeckung grundlegender BIM-Funktionalitäten und Node.js als server-seitige Programmierumgebung.

BIMserver fungiert als zentraler Datenspeicher für IFC-Dateien, generierte 3D-Geometrien und erstellte Mängelpunkte. Ein bidirektionaler Service von *Node.js* wird erstellt, um einen schnellen Austausch von BIM-bezogenen Daten zwischen den verbundenen Parteien zu ermöglichen. Die ausgetauschten Daten basieren auf dem WebSocket-Protokoll (Fette und Melnikov, 2011) und liefern eine nahezu zeitnahe Netzwerkleistung. Es bietet Datenkompressions-, Caching- und Protokollierungsmethoden sowie APIs zur Kommunikation mit dem *BIMserver*.

Grundlage für die Entwicklung bilden die zuvor erhobenen Anforderungen sowie die Rückmeldungen aus den Baustellenversuchen. Abbildung 10 stellt den umgesetzter Closed-Loop-BIM-Exchange-Service dar. Dieser ist in Dashboard (Webservice) und der AR-Anwendung unterteilt. Auf Basis dieser Feedbackloops aus den Versuchen wurde der Exchange Service verbessert und mit den folgenden Funktionen erweitert:

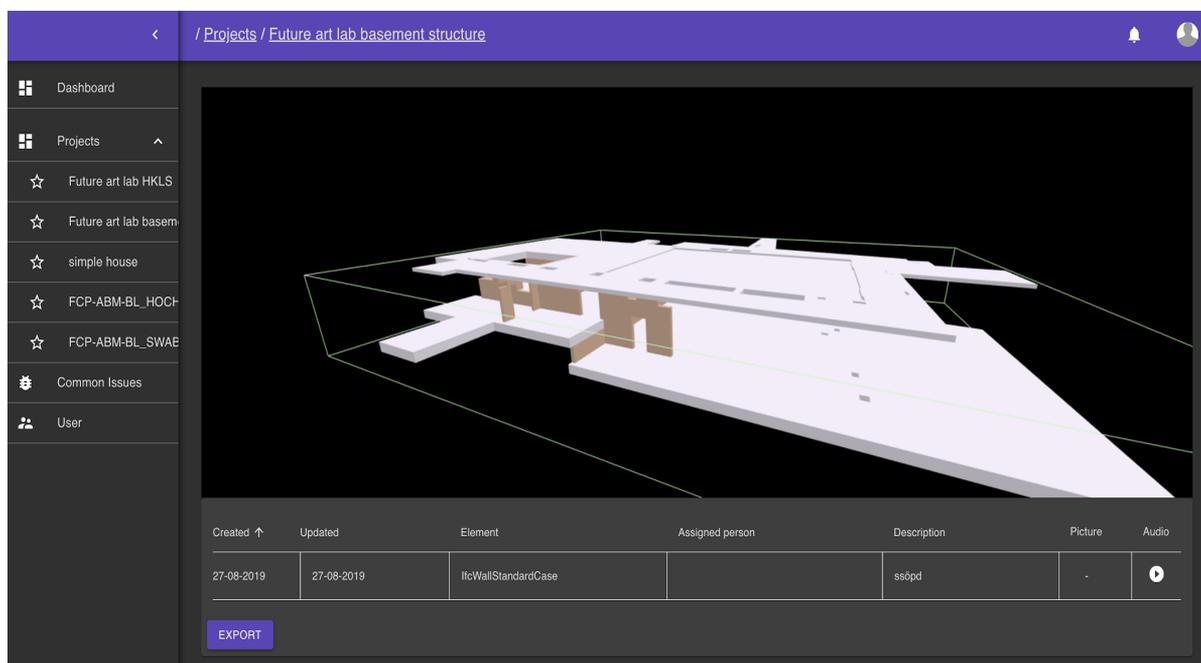
- Verwalten von Clients, um verschiedenen Clients unterschiedliche IFC-Modelle zuweisen zu können.
- Mängelmanagementtool
- Verbinden von mehreren .ifc-Dateien mit einem bestimmten Projekt.
- Erstellen und Exportieren von BCF-Paketen aus den Mängeldaten. Standard-BCF-Pakete, die Informationen über das IfcElement, einen Screenshot, eine Beschreibung und eine Kameraposition zum Zeitpunkt der Erstellung/Änderung der Mangelmarkierung enthalten, können direkt aus dem Dashboard exportiert und direkt in jede andere Software importiert werden, die BCF unterstützt (Solibri, Revit etc.).
- Verwalten von Mängel-Gruppen.
- Verwalten der verantwortlichen Personen, denen die Mängelbearbeitung zugewiesen werden kann.
- Verwalten von IfcElement-Ebenen (benutzerdefinierte Gruppen von IfcElements, die bei Verwendung eines AR-fähigen Geräts aktiviert/deaktiviert werden können).

Abbildung 10: Umgesetzter Closed-Loop-BIM-Exchange-Service (Dashboard, AR-Anwendung)



Das Projektteam entwickelte eine Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 11), um einen einfachen Zugriff auf die Projekte zu ermöglichen. Darin melden sich die Benutzer:innen an, um die BIM-Projekte erstellen, lesen, aktualisieren und löschen zu können, eine schnelle Vorschau auf die 3D-Modelle zu erstellen, den Fortschritt zu sehen und die erfassten Mängel verwalten und exportieren zu können.

Abbildung 11: Benutzeroberfläche für den Projektzugriff



5.3. BIM-AR-Interaction-System

Gleichzeitig mit der Entwicklung des bidirektionalen Datenaustauschs zwischen BIM-Server und AR-Brille, beschäftigt sich das Projektteam mit der Interaktion mit dem BIM-AR-Modell auf der Brille – also einer App mit Benutzeroberfläche. Dabei steht die für den Betrieb auf der Baustelle ideale Benutzungsführung im Mittelpunkt.

Für die Entwicklung eines BIM-AR-Interaktionssystems hat sich das Projektteam für die Unity 3D Rendering Engine entschieden. Die Wahl dieses Softwarepakets ermöglicht es, mehrere Augmented-Reality-fähige Hardwaregeräte einzusetzen. Gemeinsam mit den Projektpartnern IBPM und DAQRI entwickelte ARIOT eine intuitive Benutzeroberfläche, mit der die Benutzer:innen über die AR-Brille entsprechende Informationen eingeben. Das BIM-AR-Interaktionssystem baut auf den Ergebnissen aus der Anwendungs- und Anforderungsanalyse auf. Es kann in mehreren Teilaufgaben beschrieben werden.

5.3.1. Laden des BIM-Modells

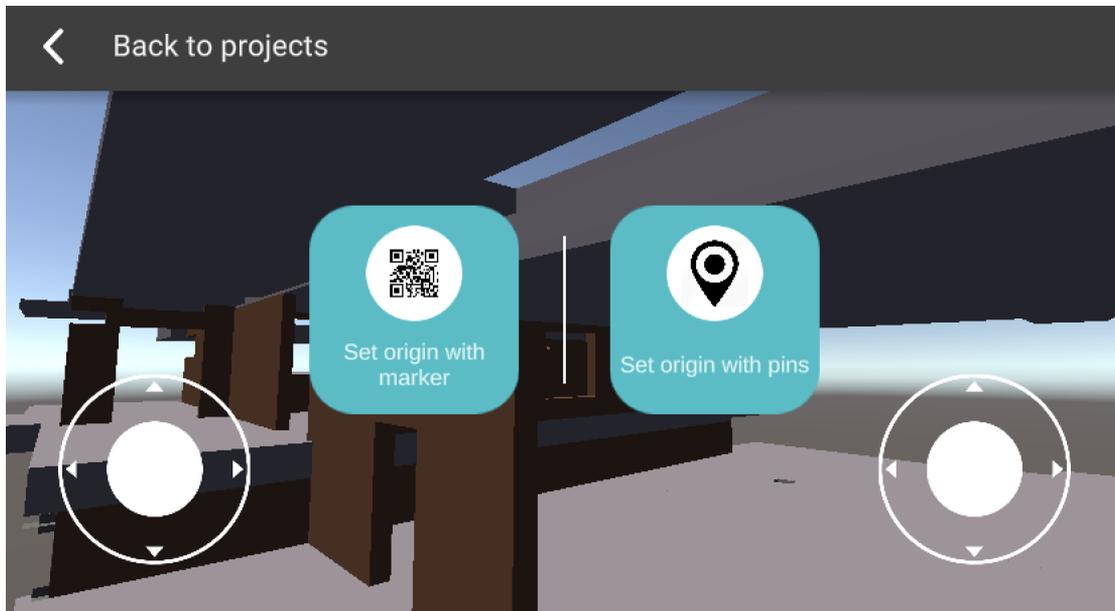
Während der Entwicklung der Anwendung wurden mehrere Problembereiche identifiziert. Die Hardwaremöglichkeiten (Speicher und CPU-Leistung) der verfügbaren AR-fähigen Geräte sind noch eingeschränkt. So können IFC-Dateien von BIM-Modellen mit vollständiger Gebäudegeometrie nicht in die AR-App geladen werden oder die AR-Geräte können die gewünschten FPS nicht rendern. Einige BIM-Softwarepakete setzen die Typen der Elemente auf *IfcBuildingElementProxy*. Dies verhindert die Verwendung einiger Optimierungstechniken, um die Anwendung mit den gewünschten FPS laufen zu lassen. Einige geometrische Elemente enthalten mehr als 65.536 Vertices; dies verhindert eine korrekte Darstellung des 3D-Objekts in der Software Unity3D. Für letzteres Problem konnte im Projekt eine Lösung identifiziert und umgesetzt werden.

5.3.2. Synchronisation von physischer und virtueller Umgebung

Für einen präzisen Abgleich des Ist-Zustands auf der Baustelle mit dem Soll-Zustand des BIM-Modells muss das virtuelle BIM-Modell korrekt in den realen Räumlichkeiten referenziert werden. Derzeit gibt es drei Matching-Möglichkeiten, welche in diesem Projekt getestet wurden:

Markerabgleich: Vor Projektbeginn war angedacht, diese Referenzierung über sog. Marker (Urban et al., 2019) zu ermöglichen, da diese bereits von der DAQRI AR-Brille zur Verfügung gestellt wurden. Beim Testen der Anwendung wurde festgestellt, dass dieser Ansatz aufgrund kleiner Ungenauigkeiten in der Positionierung des platzierten Markers in der realen Umgebung am fehleranfälligsten ist. Die Auswahl des Markerabgleichs ist in Abbildung 12 ersichtlich.

Abbildung 12: Auswahl eines Verfahrens zur Ursprungssynchronisation



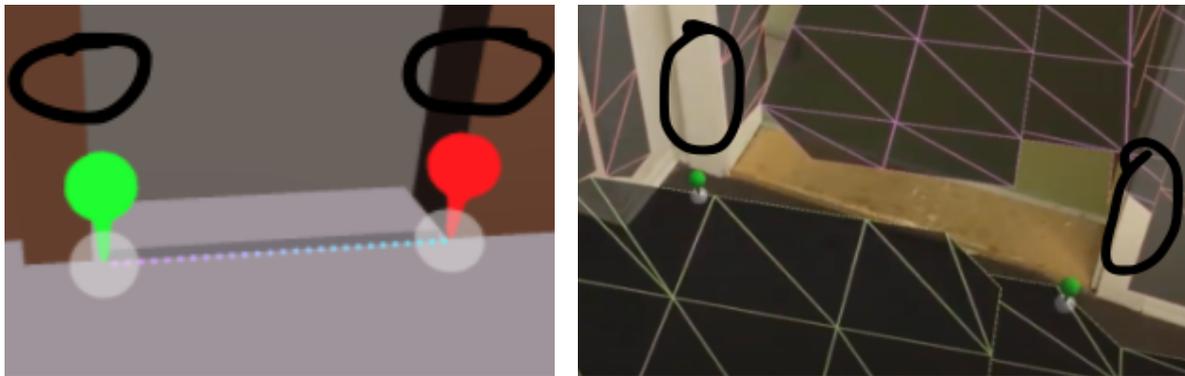
Nach der ersten Baustellenbesichtigung zeigte sich jedoch rasch, dass das Anbringen von Markern auf der Baustelle zwecklos ist, da diese nicht über den gesamten Baufortschritt hinweg an exakt der gleichen Stelle verweilen können. Bevor deshalb eine Anbindung an das BIM-Framework denkbar ist, musste die korrekte Referenzierung der Modelle auch im Baustellenumfeld sichergestellt werden.

Abgleich eines 3D-Punktes und eines 3D-Richtungsvektors in der realen Umgebung und in der AR-Umgebung: Dieser Ansatz funktioniert gut, wenn die Bezugspunkte korrekt definiert sind.

Ungenauigkeiten können durch menschliche Fehler entstehen (Verschieben der Geräte bei der Definition des Ursprungs etc.). Abhängig von der Detailebene des BIM-Modells ist es oft schwierig, die genaue Position des Ursprungs des Modells zu definieren. Wenn Benutzer:innen z.B. eine Eingangstür als Bezugspunkt für den Ursprung wählen, enthält das BIM-Modell nur ein IfcOpening-Element, aber die Eingangstür in der realen Umgebung könnte bereits einen Holzrahmen haben. Dies bringt einen gewissen Grad an Ungenauigkeit mit sich (siehe Abbildung 13). Die Auflösung des 3D-Netzes kann verbessert werden, indem derselbe Bereich mehrmals neu gescannt wird, was sich jedoch als sehr zeitaufwändig erweist. Diese Methode wurde bei den Praxistauglichkeitstests am häufigsten angewendet, da sie sehr zuverlässig funktioniert, wenn die Probanden wissen, welche Punkte beachtet werden müssen.

Um diese Ungenauigkeiten in den Griff zu bekommen, hat das Projektteam ein Werkzeug entwickelt, mit dem die Position des AR-Modells in Echtzeit angepasst werden kann. Es funktioniert, indem ein bestimmtes IfcElement in der AR (z.B. ein Türrahmen) ausgewählt und verschoben/gedreht wird, damit es mit dem realen Objekt übereinstimmt, während sämtliche andere holographischen Elemente ausgeblendet werden. Sobald der/die Benutzer:in mit dem Ergebnis zufrieden ist, wird die geänderte Ausrichtung auf die Ausrichtung des gesamten AR-BIM-Modells angewendet.

Abbildung 13: Auswählen eines Ursprungspunkts und Definieren einer Richtung (HoloLens 2): 3D-Modell (links) und Reale Umgebung samt Scan (rechts)



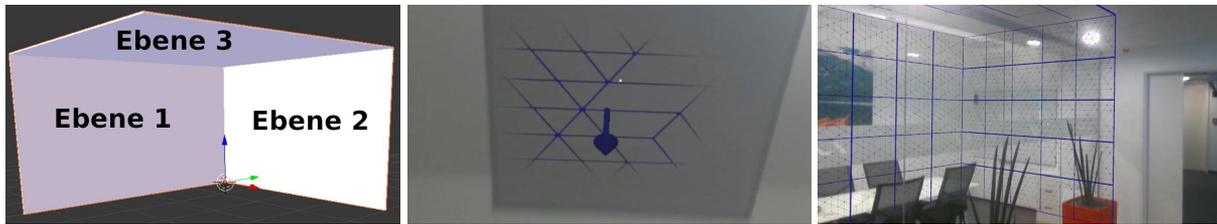
Die Tiefensensoren der HoloLens 2 haben einen beschränkten Scanbereich, der bei Tätigkeiten in weiten Umgebungen (z.B. Gebäude mit einer Deckenhöhe von mehr als 5 m) Probleme verursachen kann. Ebenso reduziert sich die Tracking-Genauigkeit in sehr reflektierenden oder kontrastlosen (einfarbig) Umgebungen, was ein häufiges Problem bei allen Tracking-Geräten ist, die auf visuellen und tiefenbasierten Tracking-Algorithmen aufbauen.

Abbildung 14: Einstellen der Position eines einzelnen ausgewählten Ifc-Elements



Definition von drei orthogonalen Ebenen im BIM-Modell und in der realen Umgebung: Der im Projekt getestete Ansatz von der Firma DAQRI versucht, mindestens drei im BIM-Modell ausgewählten Ebenen mit den gleichen drei ausgewählten Ebenen in der realen Welt abzugleichen. Zunächst werden deshalb mindestens drei nicht koplanare Flächen im BIM-Modell definiert (siehe Abbildung 15, links). Dies kann entweder in einer eigenen BIM-Software (z. B. Autodesk Revit) erfolgen oder die Benutzer:innen der DAQRI AR-Brille laden das BIM-Modell und wählen die Ebenen in dem geladenen Modell direkt aus. Anschließend müssen die gleichen Ebenen in exakt derselben Reihenfolge auch in der realen Welt ausgewählt werden (siehe Abbildung 15, Mitte). Hierfür kommt der Tiefensensor der DAQRI AR-Brille zum Einsatz, welcher eine intuitive Auswahl von planaren Ebenen erlaubt. Über die definierten Korrespondenzen von mindestens drei Ebenen kann die Transformation des BIM-Modells auf den realen Raum berechnet werden (siehe Abbildung 15 rechts). Dieses Verfahren wird in der Literatur unter anderem für SLAM-Systeme verwendet (Taguchi et al., 2013) und wurde für den vorliegenden Anwendungsfall adaptiert und getestet.

Abbildung 15: Definition von drei orthogonalen Ebenen (links) im BIM-Modell und (Mitte) in der realen Welt. (rechts) Transformation des BIM-Modells in den realen Raum (blaue Gitter-Textur)

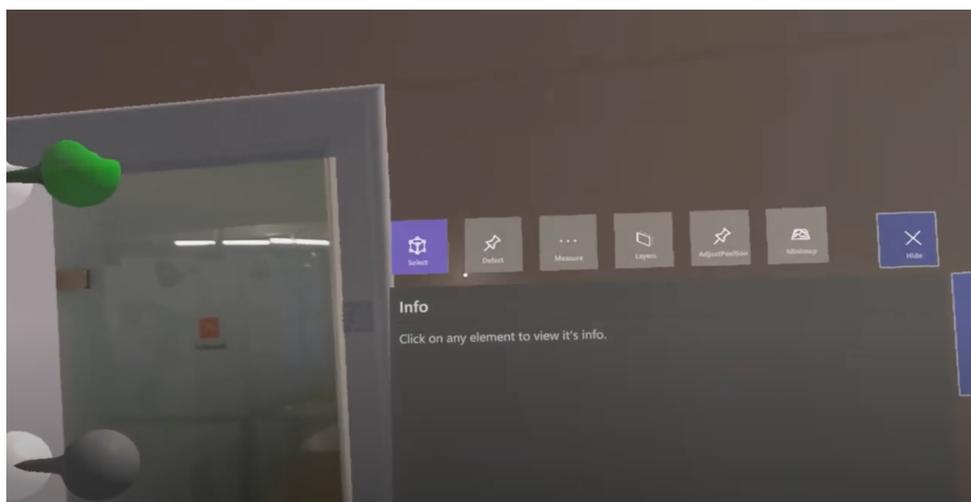


5.3.3. Interaktion in der AR-Brille

In Abbildung 16 ist das zentrale Interaktionselement (Werkzeugmenü) des Systems abgebildet (inkl. Buttons, Mängel-Tags). Der entwickelte Prototyp des BIM-AR-Interaction-Systems ist u.a. in der Lage, BIM-Modelle zu positionieren (wie in Abbildung 12) und BIM-Daten für Objekte/Bauelemente anzuzeigen. Die Mängel-Eingabe erfolgt über das Werkzeugmenü. Über dieses Menü erfolgt ebenfalls die Filterung von Mängeln bzw. Elemente. Nachfolgend sind die grundsätzlichen Interaktionsfunktionen aufgelistet:

- Der Sprachbefehl „Select“ löst einen virtuellen „Klick“-Befehl aus. Der Sprachbefehl „Pin“ setzt einen virtuellen Pin, wo eine solche Aktion anwendbar ist.
- Das Zeigen einer offenen linken Handfläche blendet das „Werkzeugmenü“ an.
- Die Handgeste „Air Tap“ löst einen virtuellen „Klick“-Befehl aus.
- Für die Blickgeste kommt ein „Lasermarker“ zur Anwendung, der immer der Ausrichtung des Kopfes des Benutzers folgt. Dieser Lasermarker spielt eine kleine Animation für die Objekte ab, für die eine Aktion gilt.
- Texteingabe: Da die primären Eingabemethoden der HoloLens 2 Sprache und Gesten sind, hat sich die Eingabe von Text als ziemlich schwierig erwiesen. Die versuchte Einbindung einer virtuellen Tastatur störte den AR-Inhalt, verschwand zwischendurch zufällig und brachte keinen Mehrwert in den Tests.
- Das Zeigen einer offenen rechten Handfläche gibt Benutzer:innen die Möglichkeit, die Anwendung sicher zu verlassen.

Abbildung 16: Darstellung des Interaktionsmenüs im Prototyp



Mängel definieren

Um einen Mangel zu definieren, muss ein AR-Objekt ausgewählt werden. Benutzer:innen wird ein Menü mit den folgenden Aktionen angezeigt:

- **Verantwortung zuweisen:** Zuordnung eines Verantwortlichen für die Lösung eines Mangels. Eine Liste der verfügbaren Mitarbeiter:innen kann im Dashboard definiert werden.
- **Datum hinzufügen:** Eine Frist für die Lösung des Problems festlegen.
- **Notiz hinzufügen:** Beschreibung des Mangels. Beschreibungen für die Objekte können im Dashboard vorausgefüllt und der spezifischen IFC-Elementklasse zugeordnet werden.
- **Audionotiz aufnehmen:** Erstellung einer Sprachaufzeichnung, die an der Mangel angehängt werden soll.
- **Foto aufnehmen:** Ein Foto des Mangels. Enthält sowohl AR als auch die reale Umgebung.
- **Schließen/Speichern/Genehmigen/Löschen:** CRUD-Befehle für das Mängel-Management.

Zusätzliche Werkzeuge unterstützen die Mängelaufnahme mit der AR-Brille:

- **Lineal:** Messen des Abstands zwischen AR und realen Umgebungsobjekten (vorausgesetzt, die realen Umgebungsobjekte werden von der AR-Vorrichtung erfasst).
- **Layers:** Ein-/Ausblenden bestimmter Schichten des BIM-Modells.
- **Minimap:** Zeigt die relativen Positionen der Mängel um den/die Benutzer:in an.

Im Forschungsprojekt wurde zuerst mit der DAQRI AR-Brille gearbeitet und nach Verfügbarkeit der neuen Microsoft HoloLens 2 das Interaktionssystem übernommen und weiterentwickelt. Anhand der Feedbacks aus Baustellenversuchen konnte die Benutzeroberfläche angepasst und um neue Funktionen ergänzt werden. Die Interaktion mit der AR-Umgebung kann über Sprachbefehle, Handgesten und Blickgesten erfolgen. Handgesten und insbesondere handgesteuerte Menüs haben den Vorteil, dass die gesamte Anwendungs-Oberfläche nur dann angezeigt wird, wenn die offene Handfläche den Benutzer:innen zugewandt ist. Dadurch ergibt sich ein maximales Sichtfeld ohne jegliche UI-Elemente im Blick und erhöht dadurch die Baustellensicherheit.

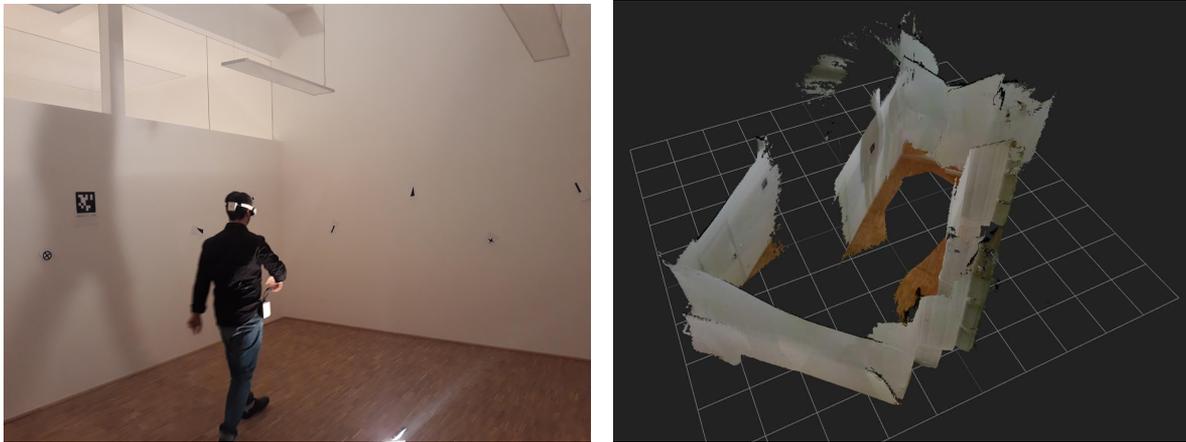
QR-Code-Tracking

In den entwickelten Prototypen konnten beliebige QR-Code erkannt, geparst und in der physikalischen Umgebung verfolgt werden. In den Baustellenversuchen konnten Herstellerinformationen/AKS-Nummern zu realen Bauteilen mittels QR-Codes über den Webserver abgerufen und mittels Gestik dem Ifc-Element (GUID) zugeordnet werden. Die modellreferenzierten Informationen konnten dann auf dem Dashboard abgerufen werden. Allerdings waren die Ergebnisse unterschiedlich. Abhängig von den Beleuchtungsbedingungen und der Größe des QR-Codes variierte die Erkennung von sofortiger bis zu sehr langsamer Erkennung. Die minimal erforderliche Größe eines QR-Codes 4x4 cm wurde in den Tests ermittelt.

5.4. Baustellentaugliches Trackingsystem

Am Beginn des Forschungsprojekts nahm das Projektteam Tests am Tracking (fortlaufenden Positionierung von AR-Brille und AR-Modell) der bestehenden AR-Brille von DAQRI vor. Die Tests fokussierten sich auf die Untersuchung des *Drifts*, da bei sehr starken, überwiegend gleichmäßig weißen Wänden keine Features vorhanden sind, an denen sich das Tracking-System orientieren kann (dies zeigen die starken Abweichungen in Abbildung 17 rechts).

Abbildung 17: Test der Abweichungen des „Drift“ im Scan bei Fehlen zusätzlicher Features



Die Versuche wurden auch auf der Baustelle durchgeführt. Das Team besuchte dafür die Baustelle der Autobahnmeisterei in Bruck a.d. Leitha. Auftraggeber ist die ASFiNAG und das Projekt wird von der Baufirma Leyrer + Graf realisiert. Zum Zeitpunkt des Besuchs befand sich die Konstruktion in der Innenausbauphase. Dies war für die Tests wichtig. Denn die MEP-Installationen waren bereits installiert, aber noch offen, da die abgehängte Decken noch nicht montiert wurden. Die Gipskartonplatten befanden sich bereits an den Wänden, wodurch überwiegend gleichmäßige Wände für die Tests herangezogen werden konnten. Der Test bestand darin, die Bereiche zu scannen, um die geometrische *Drifts* beim Scannen zu testen. Die Tests ergaben, dass das Ausmaß der *Drifts* über das letzte Jahr durch Softwareupdates zwar zurückging (siehe Abbildung 18 und Abbildung 19), aber immer noch vorhanden war. Im Zuge der Tracking-System-Tests wurde auch die Interaktionsmöglichkeit des Scans mit dem BIM-Modell getestet, um einen weiteren Nutzen der AR-Brillen zu evaluieren.

Abbildung 18: Testen des Tracking-System auf der Baustelle



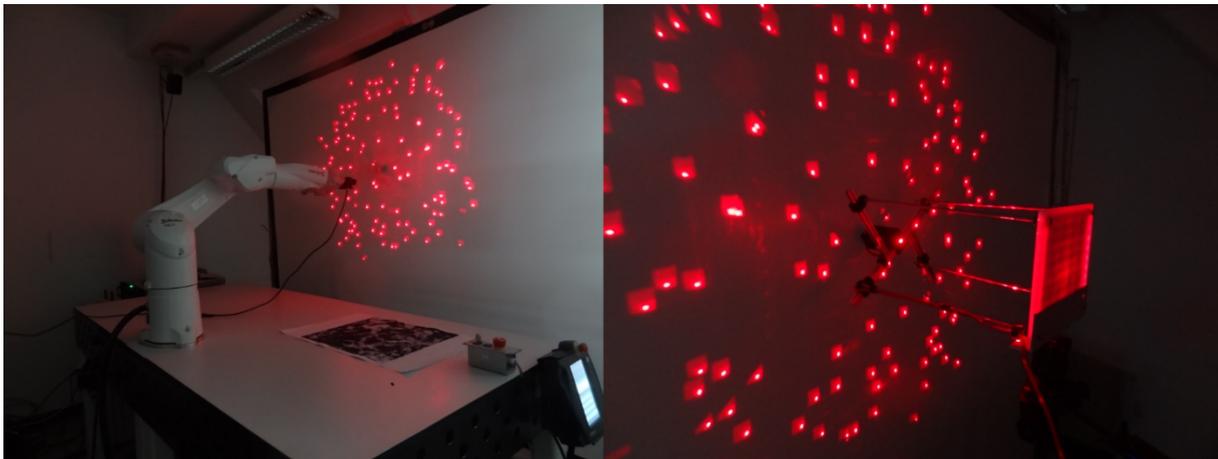
Die Ergebnisse bestätigten die früheren, unter Laborbedingungen erhalten Erkenntnisse, dass sich die Qualität des Scans bei Entfernungen über 3 m schnell verschlechterte, aber bei kürzeren Entfernungen eine ausreichende Qualität zum Scannen und Identifizieren aller kritischen Eigenschaften bietet.

Abbildung 19: Überblick Baustelle (li.), Überlagerung Scan mit dem BIM-Modell (re.)



Die Tests zeigen die Notwendigkeit eines verbesserten Tracking-Systems. Für Situationen, in denen dem SLAM-Algorithmus aufgrund mangelnder Textur oder Beleuchtung im Anwendungsumfeld zu wenig Features zur Verfügung stehen, entwickelte das Forschungsteam in diesem Task eine neuartige Trackingmodalität. Dabei werden auf untexturierte Flächen (idealerweise die Decke) mittels eines Lasers Features projiziert, die dann im Kamerabild erkannt werden und die Berechnung der 3D-Pose ermöglichen. Mit dem Laserprojektionstracking wurden verschiedene Tests der Trackinggenauigkeit durchgeführt. Im ersten Ansatz wurde eine kalibrierte Kamera auf einem Roboterarm montiert (siehe Abbildung 20). Der Roboter war programmiert, eine vorgegebene Serie von Posen anzusteuern.

Abbildung 20: Tests der Trackinggenauigkeit: Kamera wird mit einem Roboterarm bewegt



Durch die hohe Wiederholgenauigkeit der Roboterbewegung (unter 1/10 mm) erhielt das Team eine Art „Ground Truth“, um die Trackingwerte zu vergleichen. Bei Tests mit ca. 40 verschiedenen Posen ergaben sich durchschnittliche Abweichungen von 2,5 cm und 0,025 Radiant. Die Abweichungen für die Testserie sind in Abbildung 21 dargestellt.

Abbildung 21: Ergebnisse der Trackinggenauigkeit mit Kameraposen, die von einem Roboterarm angesteuert wurden



Für den ausgewählten Ansatz – des Trackings eines unabhängigen Feature-Musters – entwickelte das IMS-Forschungsteam den Laserprojektor (siehe Abbildung 22) aus der ersten Projektphase weiter (robustere Einhausung der Elektronik etc.), der ein vordefiniertes Punktmuster projiziert.

Abbildung 22: Laserprojektor (links) in der simulierten Einsatzumgebung Parkgarage. HoloLens 2 mit aufgesetzter Trackingkamera auf Stativ (rechts).

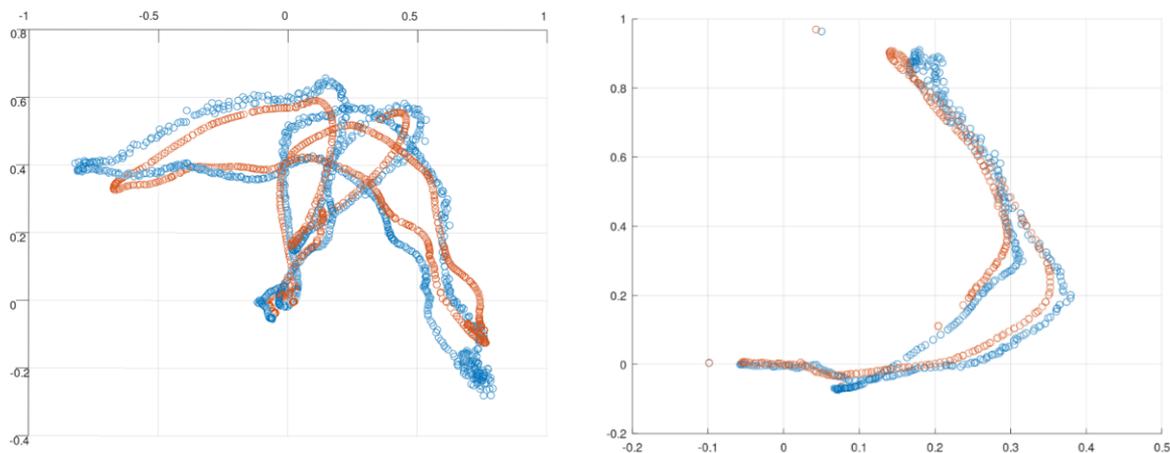


Zur Bestimmung der Pose der Kamera muss die Übereinstimmungen zwischen dem projizierten Muster und seiner perspektivischen Projektion im Kamerabild ermittelt werden. Hier wurden verschiedene Optimierungen implementiert, um die Erkennung der Laserpunkte (Blobs) in den Kamerabildern zu verbessern bzw. die Posen-Berechnung robuster zu gestalten. Darüber hinaus wurde ein Netzwerkinterface und Methoden implementiert, um Trackingdaten zwischen Laserprojektion und HoloLens 2 zu synchronisieren, aufzuzeichnen und zu vergleichen.

Das Forschungsteam hat Tests der Trackinggenauigkeit mit dem Laserprojektionstracking in den simulierten Anwendungsumgebungen einer Parkgarage mit HKLS-Installationen und dem Technikraum einer U-Bahn-Station „An den Alten Schanzen“ durchgeführt. Daten des Laserprojektionstracking wurden dabei simultan zu den Trackingdaten der HoloLens 2 aufgezeichnet und verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass die Reflektionen der Laserpunkte auch auf strukturierten Oberflächen stark genug sind, um sie in den Kamerabildern sinnvoll zu verarbeiten. Lediglich größere, stark spiegelnde Oberflächen sind problematisch. Projektionsdistanzen von 50 cm bis hin zu mehreren Metern sind prinzipiell möglich. Nur in Situationen, wo große Distanzen (Raumhöhen) mit geringen Distanzen und Abschattungen abwechseln (z.B. in dem großen, stark verbauten Technikraum An den Alten Schanzen) ist Tracking mit dieser Methode kaum möglich (erschwerend kommen hier noch die reflektierenden Bauteile hinzu).

Es wurden mehrere Datensätze mit für die Abnahme typischen Bewegungen mit insgesamt ca. 7.500 Einzelbildern aufgezeichnet und ausgewertet (siehe z.B. Abbildung 23). Dabei ergaben sich durchschnittliche Abweichungen von 2 bis 5 cm. Der Jitter bewegt sich im Submillimeterbereich. Diese Ergebnisse sind in dem Kontext relativ gut, insbesondere da es sich hier um rein optische Trackingdaten handelt. In den meisten Systemen werden optische Trackingdaten mittels Accelerometer noch geglättet, was anhand des geringen Rauschens in den Daten für das Laserprojektionstracking nur unter schwierigen Bedingungen notwendig scheint.

Abbildung 23: Trackingdaten des Laserprojektionstracking (blau) und der HoloLens 2 (rot): Person bewegt sich in einer Parkbox der Parkgarage und inspizierte die HKLS-Installationen (links) sowie Person bewegt sich mit je einem Schritt nach rechts und vorne und wieder zurück (rechts)

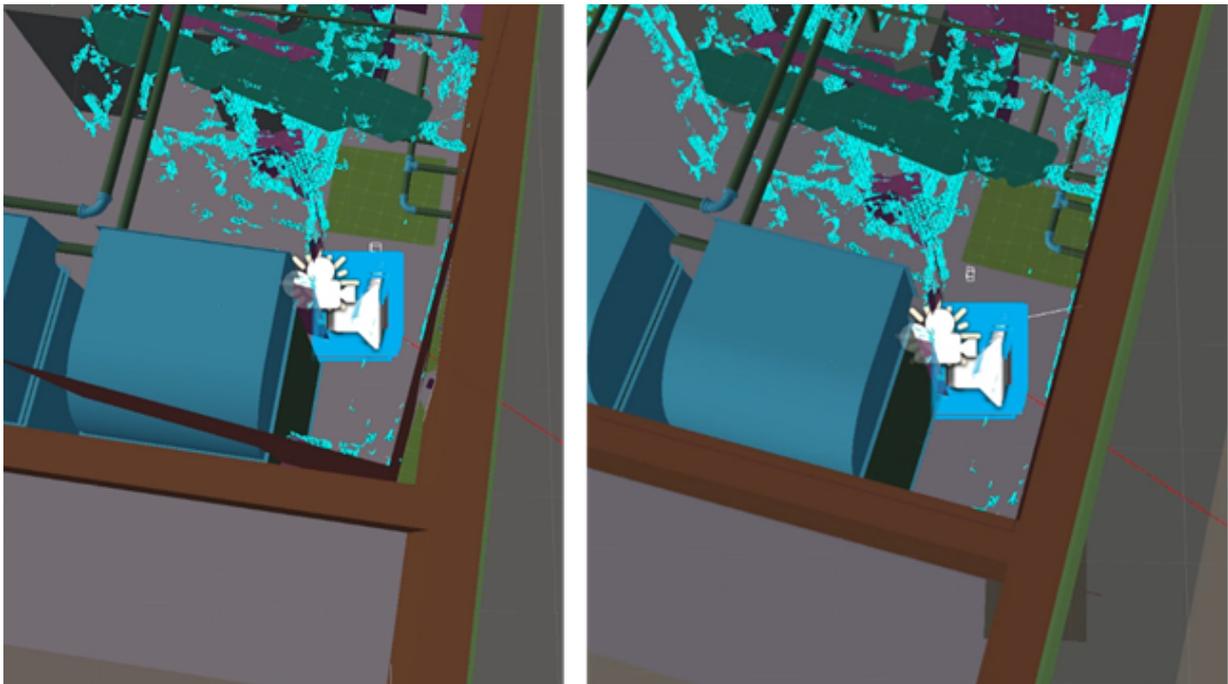


Die Daten scheinen auch in sich konsistent zu sein, d.h. die getrackten Pfade sind teilweise nur um einen konstanten Offset zum Tracking der HoloLens 2 verschoben. Dies könnte auch auf Abweichungen in der initialen Registrierung zurückzuführen sein, während die eigentlichen Trackingdaten besser sein könnten als gemessen. Weitere Verbesserungen der Trackingqualität und Usability sind hardwareseitig durch ein umfassendes Redesign möglich. Dabei könnten optimierte optische Komponenten Fehler reduzieren und die Baugröße dramatisch reduzieren.

Die Erweiterung des SLAM-Algorithmus, die Informationen aus dem BIM-Modell mit den Daten der 3D-Rekonstruktionen abgleicht und so die absolute Genauigkeit der Trackingdaten verbessert,

lieferte ebenfalls gute Ergebnisse. Dabei müssen allerdings BIM-Modell und Rekonstruktion mindestens lokal um den User einigermaßen korrekt sein. Im Falle grober Baumängel oder Rekonstruktionsfehler aufgrund von Reflexionen o.Ä. kann es zu Fehlern kommen. In den getesteten Einsatzumgebungen funktionierte die Methode jedoch weitgehend problemlos. Für eine typische Umgebung (z.B. Alte Schanzen) beträgt die Laufzeit eines einzelnen Abgleichs auf einem Laptop mit Intel I7 9750H wenige Hundertstelsekunden, auf der HoloLens 2 jedoch 1 bis 2 Sekunden. Prinzipiell ist es möglich, die Methode im Hintergrund auszuführen. Um die angesprochenen Probleme bei Abweichungen zwischen BIM-Modell und Realität zu vermeiden, wurde die Methode ins Interface integriert und kann vom User bewusst getriggert werden. Abbildung 24 zeigt die Rekonstruktion einer Szene überlagert mit BIM-Modell und der originalen und der BIM-Modell-basierten Verbesserung der Trackingpose.

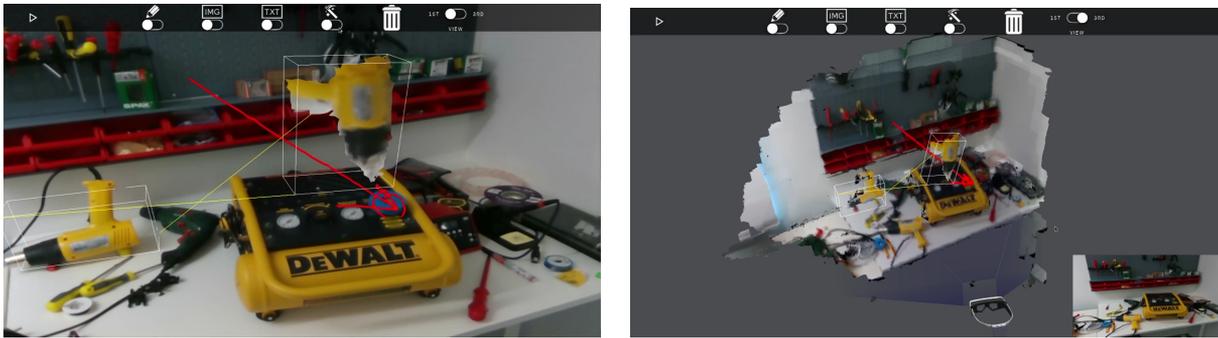
Abbildung 24: 3D Rekonstruktion der Szene überlagert mit BIM-Modell (links). Mit dem BIM-Modell basierte Verbesserung der Trackingpose (rechts)



5.5. Remote-Expert-System

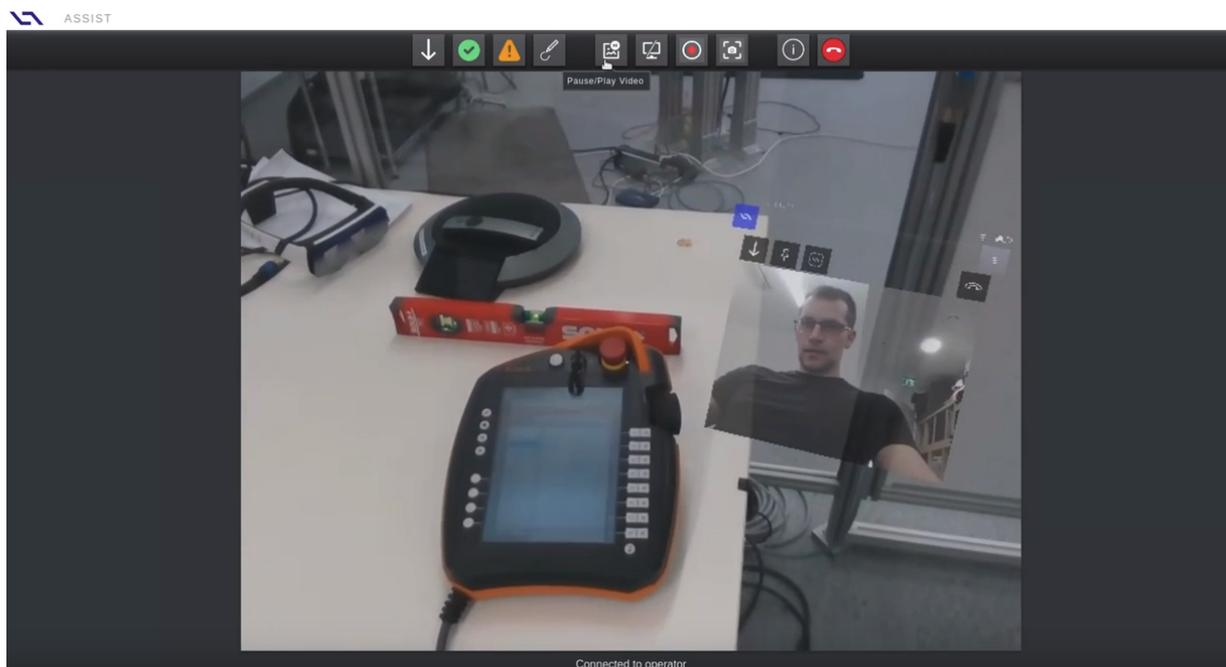
Einen großen Mehrwert im zukünftigen Baustelleneinsatz von AR-Systemen stellt das Remote-Expert-System zur Zuschaltung von *Remote Experts* zur AR-Brille tragenden Person auf der Baustelle. Das Projektteam entwickelte dieses System für beide im Projekt eingesetzten AR-Brillen. Am Anfang des Forschungsprojekts entwickelte der Forschungspartner DAQRI in Absprache mit den Projektpartnern einen Prototyp des Remote-Expert-Systems, der in Abbildung 25 dargestellt ist.

Abbildung 25: Darstellung Interface erstes Remote-Expert-System



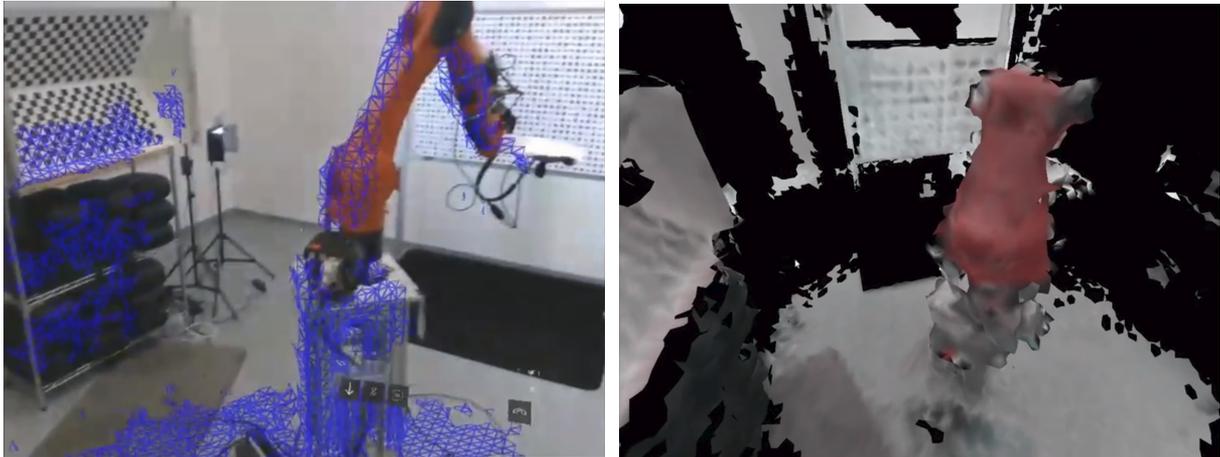
Das Feedback aus Tests auf Baustellen führte zur Weiterentwicklung des Prototyps, genannt „Assist“ (Hala, 2021; El Jazzer 2021), basiert auf dem WebRTC-Standard, um eine schnelle und latenzfreie Audio- und Videoübertragung selbst über langsame, mobile Datenverbindungen zu ermöglichen (siehe Abbildung 26). Da WebRTC hauptsächlich für Internetbrowser entwickelt wurde, war die Programmierung der Audio- und Videoverbindung für eine native Applikation für ein Yocto-basierendes Linux Betriebssystem eine besondere Herausforderung.

Abbildung 26: Interface des Assist Prototypen inkl. Video aus Sicht der DAQRI AR-Brille inklusive aller Elemente, welche auch für die Träger:innen der AR-Brille sichtbar sind (in diesem Fall das Video des Remote Expert).



Zusätzlich zur Übertragung von Bild und Ton erlaubt Assist auch die Aufzeichnung von geometrischen Daten, indem die Umgebung mit Hilfe des verbauten Tiefensensors in 3D rekonstruiert wird. Um die latenzfreie Übertragung des Audio- und Videokanals nicht zu beeinträchtigen, erlaubt der neu entwickelte Assist die Erstellung einer Rekonstruktion, ohne dabei zunächst zusätzliche Daten an Remote Experts übertragen zu müssen. Erst wenn die Person mit der AR-Brille die Rekonstruktion abgeschlossen hat, werden die geometrischen Daten an den Remote Expert übermittelt (siehe Abbildung 27).

Abbildung 27: Visualisierung der 3D-Rekonstruktion auf den DAQRI AR-Brille (links) und die übertragenen geometrischen Daten nach Abschluss der Rekonstruktion (rechts)



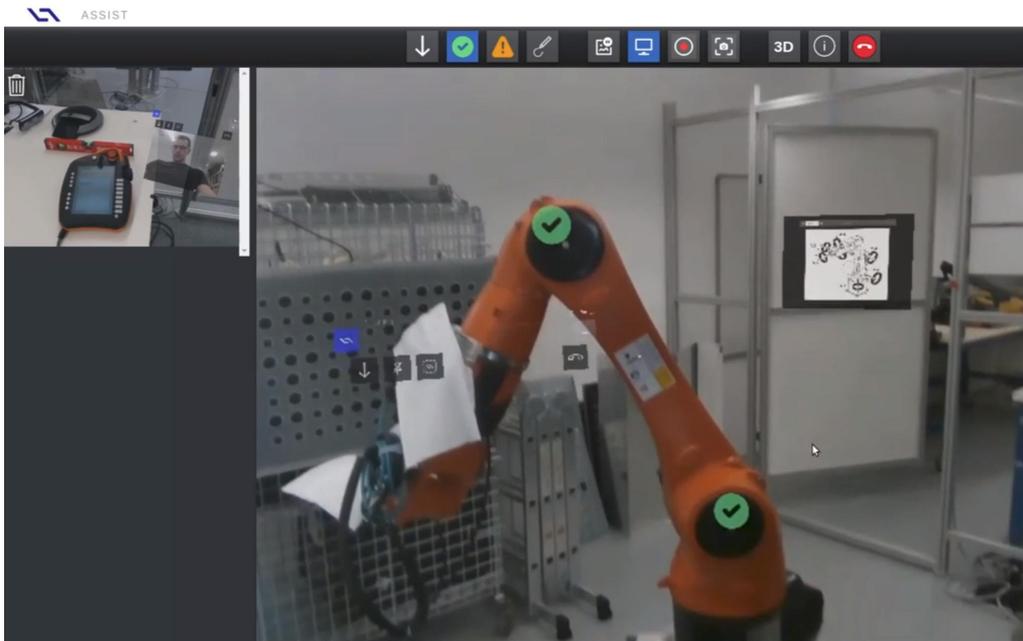
Interaktionsmöglichkeiten der Expert:innen im Remote-Expert-Systems

Das Remote-Expert-System soll Interaktionsmöglichkeiten zwischen *Remote Experts* und den die AR-Brille tragenden Personen auf der Baustelle besitzen. Dazu erhielt der Prototyp verschiedene Interaktionsmöglichkeiten (siehe auch Abbildung 28):

- *Remote Experts* können verschieden Symbole (z. B. Warnung- oder Häkchen-Symbol sowie Pfeile) in der Szene platzieren, um lokalen Arbeiter:innen genaue Anweisungen zu geben. Auf gleiche Weise kann auch die die AR-Brille tragende Person mit Hilfe der AR-Brille einen Punkt im Raum mit einem Pfeil versehen, um die *Remote Experts* wissen zu lassen, auf welchen Punkt im Raum sich dieser bezieht.
- Ähnlich zu den Symbolen können *Remote Experts* in die Szene zeichnen, um damit gewisse Bereiche zu markieren oder schnell Anweisungen zu erteilen, wenn die vorhandenen Symbole nicht ausreichen.
- *Remote Experts* können Inhalte des Bildschirms mit der AR-Brille teilen. Dabei überträgt das System Bilder oder Anleitungen, welche der Person vor Ort helfen, das Problem zu lösen.
- Ebenfalls angedacht war zunächst die Segmentierung von Objekten aus der 3D-Rekonstruktion, um diese für Instruktionen wieder zu verwenden. Experten-Feedback zeigte jedoch, dass diese Interaktionsmöglichkeit als nicht zielführend betrachtet wird.

In Abbildung 28 werden in der Software des Remote-Expert-Systems einerseits die zu überprüfenden Stellen mit Häkchen markiert. Zusätzlich wurde rechts ein Erklärbild eingefügt, das der Person vor Ort zur Verfügung steht.

Abbildung 28: Remote-Expert-System: Beispiel für die Markierung zu kontrollierender Stellen und Einblenden zusätzliche Informationen (weißes Erklärbild rechts)

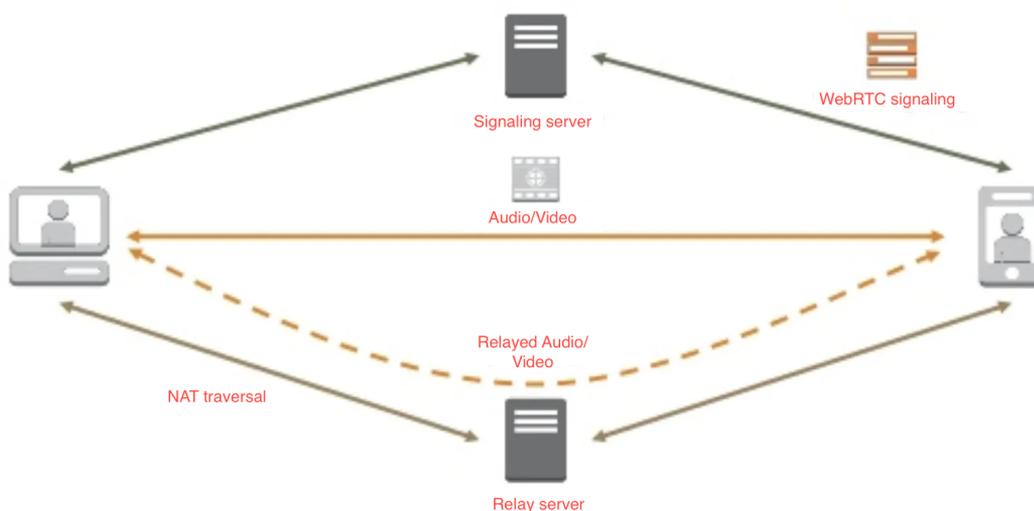


Die Kombination aus Audio- und Videoübertragung, 3D-Rekonstruktion und Augmented Reality-Anweisungen stellt auch im akademischen Bereich eine Neuheit dar, weshalb dieser Ansatz auf der Konferenz *International Symposium on Mixed and Augmented Reality* publiziert und auch als Demo präsentiert werden konnte (Zillner et al., 2018). Dabei führte die Präsentation des Prototypens zu neuen Erkenntnissen. Beispielsweise wurden die Markierungen und das Zeichnen als besonders schnelle und präzise Interaktionsmöglichkeit anerkannt.

5.5.1. Interaktionsmöglichkeiten

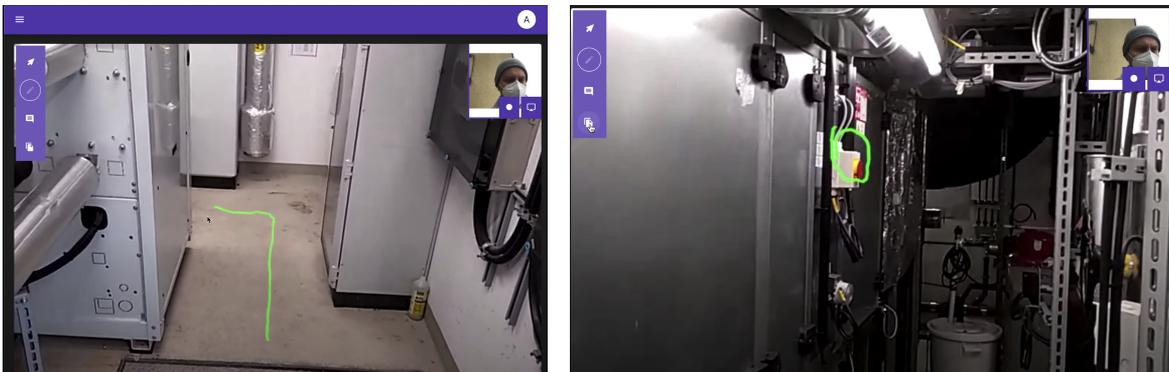
Für die neuere HoloLens 2 wurden folgende Interaktionsmöglichkeiten zwischen HMD-Nutzer:innen und Remote-Expert:innen entwickelt:

Abbildung 29: Remote-Expert-System-Architektur



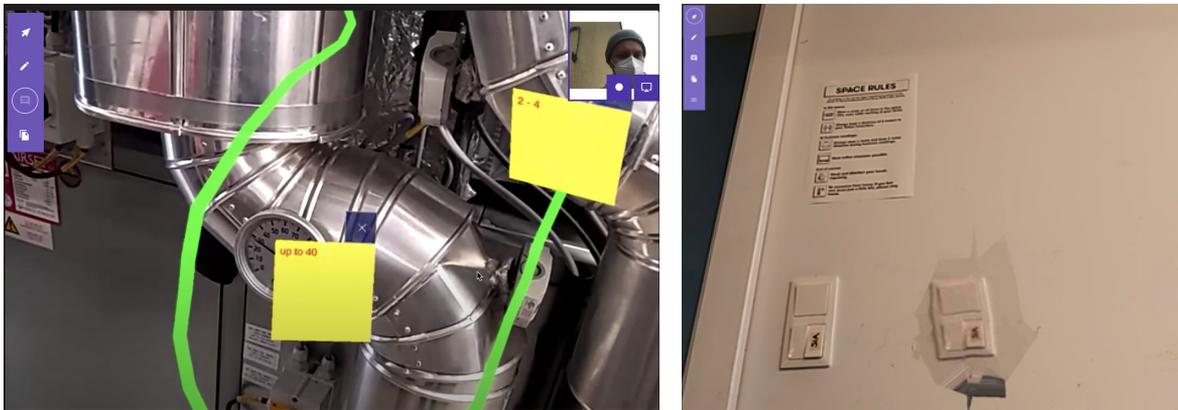
- Zwei-Wege-Audio/Video-Kommunikation. Die AR-Hologramme werden in den ausgehenden Videostream der HoloLens 2 eingebettet.
- Über die Fernzuschaltung können neue Hologramme erstellt werden, die dann direkt in der Ansicht der HoloLens 2 gerendert werden. Dies erlaubt das Zeichnen von 3D-Linien (die Points of Interest markieren) oder einer Wegführung auf dem Boden, um den HoloLens 2-Benutzer durch das Gebäude zu leiten (siehe Abbildung 30, links). Zusätzlich ist das Einzeichnen von Anmerkungen wie Pfeile, Kreise oder Rechtecke möglich (siehe Abbildung 30, rechts).
- Über die Fernzuschaltung kann der Bildschirm des zugeschalteten Geräts freigegeben werden. Dies ist nützlich, wenn zugeschaltete Nutzer:innen ein Tutorial-Video, ein Gebäudemodell, eine Dokumentation usw. zeigen möchten. HoloLens 2-Benutzer:innen können also alles sehen, was auf dem Bildschirm der *Remote Experts* angezeigt wird. Diese Funktion ist nur auf Browsern verfügbar, die die „Screen Capture API“ unterstützen (Mozilla, 2018).
- Über die Fernzuschaltung kann eine Bilddatei hochgeladen und freigegeben werden. Die Bilddatei wird dann an die HoloLens 2 übertragen und als interaktives Hologramm gerendert. HoloLens 2-Benutzer:innen können das Bild im 3D-Raum bewegen, drehen und skalieren.
- Über die Fernzuschaltung können Textnotizen erstellt und diese auf die physischen Objekte in der Umgebung der HoloLens 2-Benutzer:innen angebracht werden (siehe Abbildung 31, links).

Abbildung 30: Interaktion Audio/Video und Hologramme



- Über die Fernzuschaltung kann eine 3D-Scansitzung initiiert werden, die die geometrische Darstellung der physischen Umgebung der HoloLens 2-Benutzer:innen abrufen (siehe Abbildung 31, rechts). Unter guten Bedingungen können zugeschaltete Nutzer:innen Teile der Geometrie auswählen, sie duplizieren und die duplizierte Geometrie verschieben/drehen/skalieren, die dann zurück an die HoloLens 2-Ansicht übertragen wird. Dieses spezielle Feature funktioniert unter Bedingungen mit ausreichend beleuchteter Umgebung und HoloLens 2-Benutzer:innen müssen lange genug stillstehen, damit HoloLens 2 genügend geometrische Details der Umgebung erfassen und das RGB-Kamerabild korrekt auf die geometrischen Daten abbilden kann. Wenn die Bedingungen nicht erfüllt sind, können die Ergebnisse verzerrt erscheinen.
- Über die Fernzuschaltung kann eine Bildschirmaufnahme der gesamten Sitzung aufgezeichnet und lokal als .webm-Video gespeichert werden.

Abbildung 31: Interaktion PostIT (links); 3D-Scan und Translation (rechts)



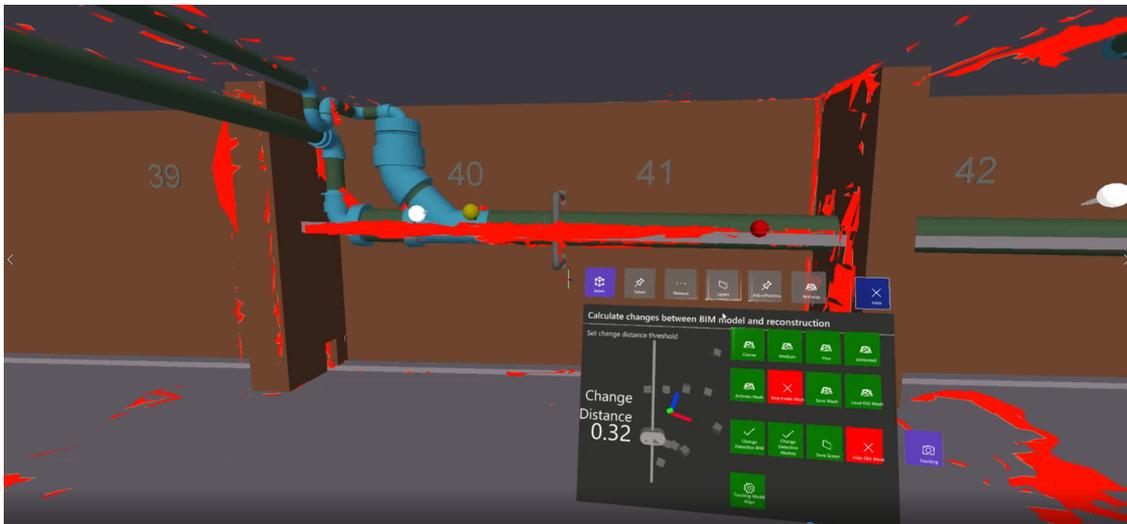
5.5.2. Interaktion zur Mängelbehebung mittels Change Detection

Im Zuge des Projektes wurde auch eine Change Detection entwickelt. Die Change Detection wurde in verschiedenen simulierten Anwendungsumgebungen getestet. Für eine relativ detaillierte Einstellung mit 400.000 Vertices beträgt die Laufzeit ca. 3 Minuten. Dabei sind Abweichungen von größeren Bauteilen und HKLS-Installationen schon gut zu erkennen. Für die Change Detection mit dem maximalen Detailgrad benötigt die HoloLens 2 ca. 1 bis 3 Minuten für einen größeren Raum. Damit können auch kleinere Installationen wie Rohre von wenigen Zentimetern Durchmesser erfasst werden. Abbildung 32 zeigt die Change Detection relativ zu einem vorherigen Scan mit der zweitfeinsten Detailstufe. Die Änderungen durch die HKLS-Installationen können dabei gut erkannt werden. Die Auflösung der Rekonstruktion ist bei vielen Details insbesondere bei automatisierten Methoden noch ein limitierender Faktor.

5.5.3. Tests des Remote-Expert-Systems von Expert:innen

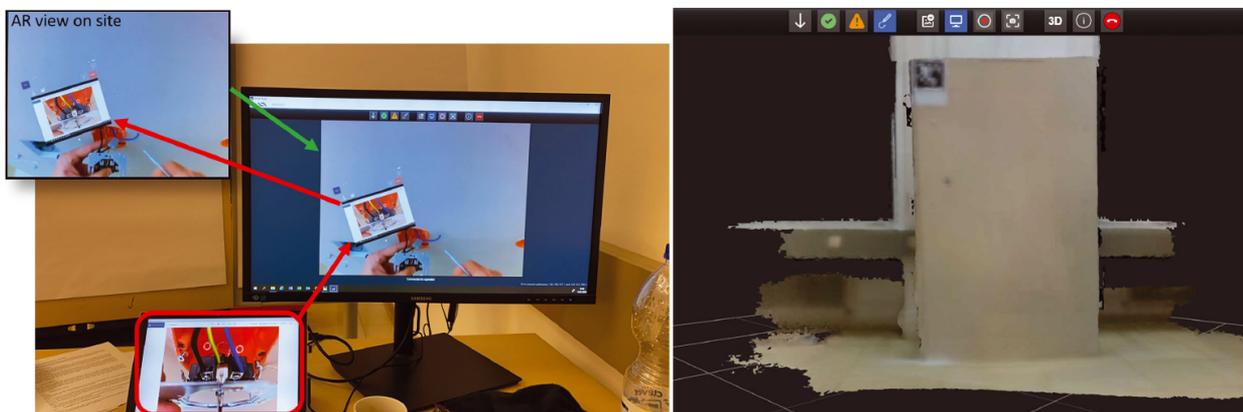
Ein an der TU Wien aufgebauter, mobiler Versuchsstand (Aluprofilrahmen mit vorgehängten Gipskartonplatten, in dem HKLSE-Systeme eingebaut werden können) ermöglichte den Test des Remote-Expert-Systems unter abgestimmten Bedingungen, sodass möglichst aussagekräftige und vergleichbare Ergebnisse erzielt werden konnten. Dies erlaubt eine detaillierte Evaluierung des entwickelten Remote-Expert-Systems (Schranz et al., 2020). Im Zuge des Versuchs wurden auf einem aufgebauten Versuchsstand eine elektrische Kreuzschaltung installiert. Die Hälfte der Probanden hat diese Aufgabenstellung mittels einer schriftlichen Anleitung zu lösen, die andere Hälfte löste dies durch die Anleitung von *Remote Experts* (siehe Abbildung 33).

Abbildung 32: Change Detection, die mit der Farbe Rot Änderungen relativ zu einem vorherigen Scan hervorhebt (unterlegt mit dem BIM-Modell).



Nach einigen Tagen wurden die Testpersonen erneut gebeten, die Schaltung zu installieren. Bei der zweiten Installation standen den Testern aber kein AR oder die Anleitung zur Verfügung. Dadurch sollte auch herausgefunden werden, ob mit AR im Vergleich zur schriftlichen Anleitung mehr oder weniger Lerneffekt stattgefunden hat. Dies war bei den Interviews in der Anwendungsanalyse eine häufige Frage. In den Untersuchungen zeigten sich dabei keine Unterschiede, d.h. der Lerneffekt mit AR war so groß, dass die Aufgabe ohne Unterstützung ebenso rasch durchgeführt werden konnte.

Abbildung 33: Remote-Expert-System zur Unterstützung vor Ort: Ansicht des Remote-Experten und HMD-Nutzers (links) und Ansicht Remote-Expert-Scan (rechts) (Versuchsstand TU Wien)



Im Technikraum der Wiener Linien fand abschließend ein umfangreicher Remote-Expert-System-Test mit den Expert:innen statt. In diesem wurden die Interaktionsmöglichkeiten und der Baustelleneinsatz anhand von Aufgabenstellungen getestet. Für eine umfangreichere Validierung wurden auch Tests in einem Technikraum der TU Wien durchgeführt. Im Rahmen der Usability-Tests wurde ein Versuchsablauf gewählt, sodass die Testpersonen beide Rollen des Remote-Systems (Remote-Experte und Baustellenanwende) einnehmen. Für einen Durchlauf diente ein fiktives Szenario einer Fernwartung einer Heizungsanlage mit den unterschiedlichen Aufgabenstellungen: Kontrolle des Flüssigkeitsdrucks mittels grafischer Einblendungen an, durch den Remote-Experten,

gekennzeichneten Stellen; Durchführen von Arbeitsschritten, die mittels Notiz bzw. Bild übermittelt sowie anhand von Skizzen erläutert wurden; Anweisung zur Versetzung eines Absperrventils mittels 3D-Scan.

Abbildung 34: Remote-Expert-System Test



Das Feedback der Testpersonen zum Remote-Expert-System war überwiegend positiv. Alle Probanden fanden das System sehr hilfreich. Als hilfreichste Funktion gaben die Testpersonen die Möglichkeit der Stiftmarkierung an. Darüber hinaus fanden die Testpersonen die geteilte Bildschirmansicht mit darin gezeigten Arbeitsanweisungen hilfreich. Diese Arbeitsanweisungen können ohne ein Verlassen der Arbeitsstelle eingesehen werden. 78 % der Testpersonen gaben an, dass sich durch dieses System die Fahrten auf die Baustelle reduzieren lassen und somit CO₂ eingespart werden kann. Vor allem die Möglichkeit, dass sich mehrere Expert:innen (z.B. Architekt, TGA-Planer, AG) zuschalten können, erhöhe die Bauqualität und beschleunige die Entscheidungsfindung. Darüber hinaus stimmten in diesem Test 55 % der Testpersonen zu, dass dieses System durch die vielfältigen Möglichkeiten von Unterstützungen (Skizzen, Notizen etc.) das Risiko von Fehlinterpretationen senkt und damit die Bauqualität steigern kann. 22% sahen den Einsatz neutral und 22% erwarten einen niedrigen Einfluss auf die Bauqualität.

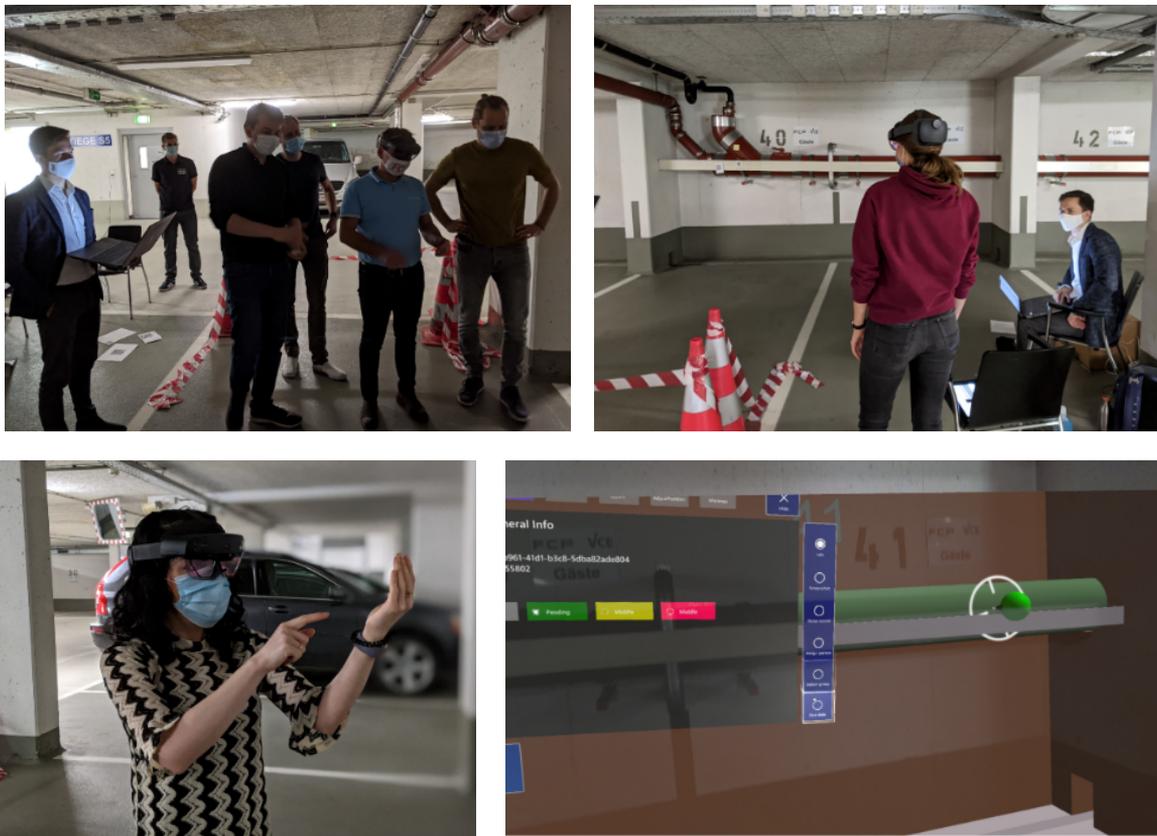
5.6. Baustellenversuche

Schwerpunkt in diesem Projekt war das Testen der entwickelten F&E-Prototypen. Durch Evaluierung der Testergebnisse erfolgte eine ständige Verbesserung der Prototypen. Aufgrund der COVID-19 Situation waren über den Zeitraum März 2020 bis September 2020 Baustellenbesuche nicht bzw. nur sehr eingeschränkt möglich. Das Projektteam wechselte daher für die Baustellenversuche auf Räumlichkeiten der TU Wien und bei FCP. Damit das Projekt weiter die notwendigen Tests unter annähernd realen Umständen durchführen konnte, wurde von FCP ein BIM-Modell der HKLS in der firmeneigenen Tiefgarage erstellt und für die AR-Anwendung optimiert.

Durchführung Baustellen-Usability Versuch Tiefgarage, FCP

Die Tiefgarage ist öffentlich zugänglich und gut gelüftet. Somit waren Tests der Prototypen ohne große Vorlaufzeiten möglich. Die Bilder in Abbildung 35 zeigen die Überlagerung eines Abwasser-Rohrs sowie die Durchführung der Experimente zur Verbesserung des Trackings. Bei dem Versuch trat das Forschungsteam der TU Wien als Testleiter auf.

Abbildung 35: Versuche in der Baustelle Tiefgarage FCP: verschiedene Nutzer:innen sowie AR-Menü zur Fehlermarkierung (unten rechts)



Den Testpersonen wurden einzelne kurze Aufgabenstellungen zu allen unterschiedlichen Interaktionen des Prototyps gestellt. Die Aufgabenstellung sollte ohne weitere Hilfestellung von der Versuchsperson durchgeführt werden. Nur in Ausnahmefällen griff der Testleiter ein. Nachdem die einzelnen Aufgaben von den Probanden durchgeführt wurden, gaben diese Feedback zum Schwierigkeitsgrad der Lösung der Aufgabenstellung, die zwischen „1 (einfach)“ und „5 (schwierig)“ zu bewerten war. Im Anschluss wurden mehrere offene Fragen, wie „Ihre Einschätzung: Vergleichen Sie konventionelle Abnahme mit der AR-Abnahme (Was ist anders? Vorteile? Nachteile?)“ gestellt.

Die Frage nach der Einschätzung, ob sich durch diese Applikation die Bauqualität verbessern würde, haben 71 % der Testpersonen bestätigt. Die Hauptbegründungen waren, dass es zu weniger Fehlern durch mangelnde Kommunikation kommen kann bzw. dass fehlerhafte Prozesse vermieden werden können. Eine Person merkte an, dass die konventionellen Abnahme-Abläufe sehr gute Ergebnisse erzielen, aber der AR-Prototyp die Effizienz deutlich steigern könnte. Hier wurde darauf hingewiesen, dass im Bereich des „back office“ wesentlich weniger Nachbearbeitungsaufwand entstehen könnte. Der Prototyp kann laut aller Befragten zu einer Effizienzsteigerung führen. Diese wurde z.B. damit begründet, dass auf die Informationen aus dem BIM-Modell zugegriffen werden kann und hierdurch alle Projektpartner:innen den gleichen Informationsstand haben. Außerdem ist eine 3D-Darstellung von komplexen HKLS-Ausstattungen wesentlich übersichtlicher und effizienter als die derzeit auf Baustellen verwendeten 2D-Pläne. Eine effizientere Nutzung zeitlicher Ressourcen wird durch den Wegfall von Arbeitsschritten beschrieben, z.B. das nachträgliche Digitalisieren von handgeschriebenen Aufzeichnungen oder das Niederschreiben von Sprachaufzeichnungen. Dies beeinflusst auch den Einsatz von personellen Ressourcen positiv. Weitere Verbesserungen werden

durch die Fortführung der Planung im Modell bis zum Anlagebetrieb und die direkte Datensicherung im Bauwerksmodell erreicht. Jedoch wurden auch Herausforderungen für den Einsatz des AR-Systems genannt, wovon folgende als die wichtigsten bezeichnet wurden:

- Staubsicherheit, Regentauglichkeit,
- Zuverlässigkeit der Software,
- Internetverbindung auf der Baustelle und
- Baustellensicherheit.

Baustelle U-Bahnstation U2 „An den alten Schanzen“

In Kooperation mit den Wiener Netzen fand eine große Baustellentauglichkeits-Überprüfung bei der U-Bahnstation „An den alten Schanzen“ statt. Das Büro FCP war mit der Planung beauftragt und konnte gemeinsam mit den Wiener Linien das BIM-Modell des Technikraums für das Projekt einsetzen. Nach einer Anpassung wurden im Technikraum (siehe Abbildung 36, oben) mehrere Versuche durchgeführt, sowohl mit dem Abnahmetool (siehe Abbildung 36, unten rechts) als auch mit dem neuen Prototyp des Remote-Expert Systems. Die Versuche zielten darauf ab, die konventionelle TGA-Abnahme mit der AR-unterstützten Abnahme (siehe Abbildung 36, unten links) zu vergleichen. Die Abnahme erfolgte daher einerseits konventionell und andererseits AR-unterstützt. Die Versuchsabläufe waren in vier Teile unterteilt.

Kontrolle behobener Mängel

Hierfür wurde eine fiktive Mangelliste vorgefertigt und Mängel vorab im AR-Modell platziert. Diese Mängel (2 Stk.) müssen mit Hilfe der Liste/des Modells im Zuge der Aufgabe gesucht, hinsichtlich deren Behebung kontrolliert und bei sachgemäßer Beseitigung freigegeben werden. Die Freigabe erfolgt bei der konventionellen Art anhand einer Notiz auf der Mangelliste, bei der AR-Methode durch Löschen der Mängel.

Mängelaufzeichnung

Zur Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse der konventionellen und AR-unterstützten Mängelaufnahme wird der Versuchsraum mit 11 Mängeln präpariert (siehe Abbildung 36, oben). Laminierte Zettel mit einer kurzen Beschreibung des Mangels werden auf den zugehörigen Bauteilen befestigt. Zur Unterstützung der Testpersonen werden die Mängelbeschreibungen während der Aufzeichnung vorgelesen.

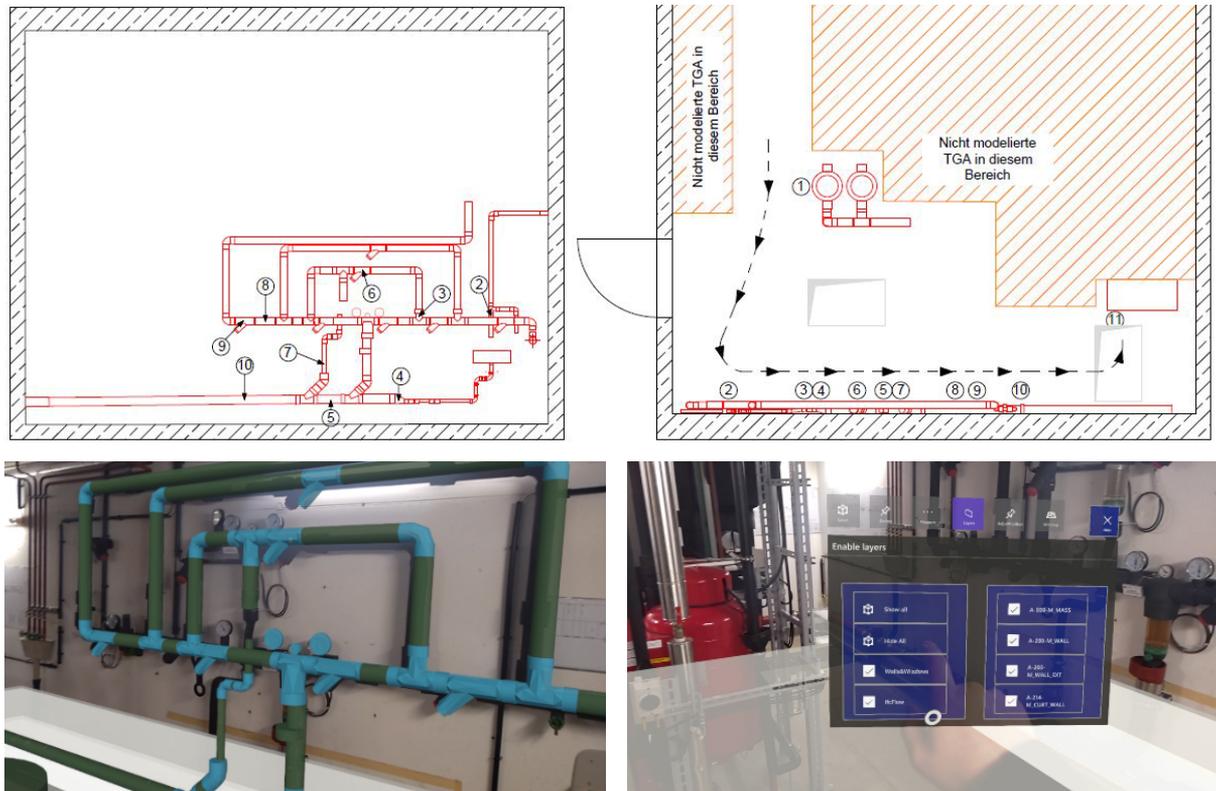
Messen

Die dritte Aufgabe besteht darin, den Abstand zwischen zwei Rohren zu messen und den Wert laut abzulesen.

Fehleranalyse

Die letzte Herausforderung des Experiments besteht in der Fehlersuche zwischen einem Plan/BIM-Modell und der Realität. Der Fehler wurde vorab in die Planunterlagen bzw. das 3D-Modell eingearbeitet.

Abbildung 36: Versuche auf der Baustelle der Wiener Linien: Anordnung der Mängel inkl. Aufzeichnungsrouten – Ansicht und Grundriss (oben); Bild der Ansicht (unten links); AR-Menü zur Mängelaufnahme (unten rechts)



Vergleich konventioneller Abnahme mit AR-unterstützter Abnahme

Beim Vergleich der beiden Methoden wurde von den Testpersonen beim AR-System positiv angemerkt, dass Fehler und bestehende Mängel schneller gefunden werden können. Dies spiegelt sich auch in den Zeiten der Versuche wider. 60 % der Testpersonen merkten an, dass Mängel genauer und zeiteffizienter aufgezeichnet werden können. Der geringere Nachbearbeitungsaufwand mit der AR-Brille aufgrund der automatisierten Abläufe und die Vielseitigkeit der HoloLens wird als Vorteil genannt. Als Nachteile führten die Testpersonen einerseits die Umgewöhnungsphase auf das AR-System und andererseits technische Probleme bzw. eine mögliche Systemträgheit an. Als störend empfanden die Testpersonen eine leicht verschobene Überlagerung, bei der das BIM-Modell nicht perfekt mit der Realität übereinstimmt. Dies führte teilweise zu Verwirrungen. Der Preis der Hardware wird ebenfalls als nachteilig angeführt.

In den Versuchen ermittelte das Testteam auch die benötigte Zeit für die konventionelle und die AR-Abnahme (Mängel erkennen und zu dokumentieren inkl. Nachbearbeitungszeit im Büro). Die Versuche zeigten, dass auf der Baustelle die konventionelle Methode durchschnittlich schneller als die AR-Abnahme ist. Dies liegt u.a. daran, dass die AR-Abnahme eine vollständig neue Interaktion mit der Software verlangt. Da sämtliche Testpersonen nur sehr wenig bis keine Erfahrung mit AR-Brillen haben, bedeutet dieser Umstand einen erheblichen Einarbeitungseffekt. Bei der Nachbearbeitungszeit dreht sich die Situation um. Die konventionelle Abnahme erfordert mehr Tätigkeiten im Büro (Audioaufnahmen ins Protokoll übernehmen, modellbasierte Fehlerzuweisung). Daher ist gesamtheitlich betrachtet die durchschnittliche Gesamtabnahmezeit pro Mangel bei der

konventionellen Abnahme mit einer Dauer von 3:01 Minuten doppelt so lange, wie jene der AR-Abnahme mit einer Dauer von 1:25 Minuten pro Mangel.

Verbesserung der Bauqualität durch die Applikation

80 % der Testpersonen sind der Meinung, dass der Einsatz von AR die Bauqualität steigert. Ausschlaggebend ist, dass die gesamte Informationsfülle des BIM-Modells und nicht nur komprimierte Daten in Form eines 2D-Plans auf der Baustelle jederzeit zur Verfügung stehen. Entscheidungen können fundiert und schneller getroffen werden. Das Mehrangebot an Informationen ist von Vorteil, um Fehler schneller zu finden und Ungenauigkeiten besser zu erkennen. Eine bessere Kommunikation zwischen den Mitarbeiter:innen auf der Baustelle mit den Kolleg:innen im Büro wurde ebenfalls positiv hervorgehoben. Die Möglichkeit, virtuelle Wartungsräume (falls sie im Modell eingebaut wurden) in der Realität darzustellen, stellt eine erhebliche Verbesserung der Bauqualität dar.

Steigerung der Effizienz durch Einsatz der Applikation

Eine Mehrheit der Testpersonen (82 %) sind der Meinung, dass die Effizienz durch den Einsatz der Applikation gesteigert werden kann. Vor allem durch die Einsparung der sonst erforderlichen Zwischenschritte (Niederschrift der Audioaufnahmen) können potentielle Fehlerquellen beseitigt werden. Der Wegfall der Verzögerung zwischen Erfassung der Mängel und dem Erstellen einer Mängelliste beschleunigt diesen Prozess erheblich.

5.7. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“

Das Forschungsvorhaben AR-AQ-Bau fokussierte sich auf das Themenfeld 1: *Digitales Planen, Bauen und Betreiben* der 5. Ausschreibung *Stadt der Zukunft*. Die Förderung wurde für das Subthema 1.2 *Augmented/Mixed Reality* angesucht, wobei dieses Forschungsprojekt ebenfalls Elemente aus dem Subthema 1.1 *Echtzeitdatenerfassung* enthält.

Die Entwicklungen dieses Forschungsprojekts (Baustellentaugliches Tracking-System, Closed-Loop BIM Exchange Service und Remote-Expert-System) und die gleichzeitig praxisnahe Tauglichkeitsprüfung von AR auf Baustellen sind in der Baubranche eine Besonderheit. Dies ermöglicht eine direkte Einbindung des entwickelten digitalen Bauprozesses in die Praxis.

Der Closed-Loop-BIM-Datenaustausch ermöglicht die Einbindung von AR in den **digitalen openBIM-Bauprozess**. Außerdem verbessert dieses System den Einsatz von BIM auf der Baustelle und erhöht den Nutzen von BIM im gesamten Lebenszyklus (z.B. QR-Code → IFC-referenzierte Wartungsdaten).

Die AR-Technologie wird in den nächsten zehn Jahren viele Prozesse verändern. Dieses Forschungsprojekt gab dabei einen entscheidenden Impuls, die österreichischen Bauunternehmen in eine Vorreiterrolle bei der Einführung dieser Technologie zu bringen und dadurch **internationale Wettbewerbsfähigkeit** zu stärken. Vor allem die durchgeführte Anwendungs- und Anforderungsanalyse in Zusammenarbeit mit den Stakeholdern ließ viele Unternehmen die Bedeutung von AR für die Baubranche erkennen (z.B. Swietelsky, Porr oder Strabag habe eigene Angestellte, welche nun eigene AR-Technologien für ihr Unternehmen entwickeln). Dadurch wird Österreich in diesem wichtigen Segment eine **internationale Technologieführerschaft** aufbauen.

Das im Projekt AR-AQ-Bau entwickelte fortschrittliche, baustellentaugliche AR-System zur Abnahme und Qualitätskontrolle auf Baustellen leistet damit Beiträge zur Reduktion der Klimawirkung. Das AR-System vereinfacht die Abnahme und Qualitätskontrolle, weshalb Nachkontrollen verringert werden. AR verbessert durch neue Möglichkeiten (QR-Code, holografische Modelldarstellung, Fernabnahme, BCF-OpenBIM-Workflow) die Bauabnahme. Dies erhöht **die Qualität der Gebäude**, was auch von den verschiedenen Stakeholdern evaluiert wurde (siehe Kapitel 5.6).

Die Versuche mit den Wiener Linien zeigten, dass durch den Einsatz von AR einerseits die gesamtheitliche Abnahmegeschwindigkeit reduziert wird. Andererseits können Fehler besser erkannt und Daten digital (ohne Medienbruch) übermittelt werden. Dies führt zu einer **Optimierung der städtischen Infrastruktur**.

Während derzeit für Besprechungen auf Baustellen oft die Anreise von vielen Expert:innen erforderlich ist, ermöglicht das neue Remote-Expert-System eine Zuschaltung der Expert:innen aus der Ferne (Büro oder gar Home-Office). Die Funktionen des Remote-Expert-Systems für die Abnahme und Qualitätskontrolle bieten eine Vielzahl an Unterstützungsmöglichkeiten für Nutzer:innen vor Ort. Aufgaben können direkt umgesetzt und unter Fern-Anleitung korrekt durchgeführt werden. Die Arbeitszeit des operativen Bauleitungspersonals besteht zu fast 50 % aus Besprechungen und Fahrzeiten (Chriti, 2015). Nicht zuletzt aufgrund gesundheitlicher (Pandemie) oder ökologischer Überlegungen (Ressourceneffizienz und Dekarbonisierung) kann dadurch die Notwendigkeit für Baustellenbesuche erheblich reduziert werden. Dies führt zu einer starken Reduktion der erforderlichen Dienstfahrten und somit zu einer **Reduktion des Verkehrs und des Schadstoffausstoßes**. Zusätzlich hat sich während der COVID-19-Pandemie gezeigt, dass der Einsatz eines Remote-Expert-Systems die während einer Pandemie verordneten Maßnahmen besser umsetzen lässt (Abstände, Reduktion von Baustellenbesuchen). Der baustellentaugliche Einsatz zukunftsweisender Technologien, die den Baustellenbetrieb optimieren, erhöht die Wettbewerbsfähigkeit der österreichischen Bauwirtschaft. Die einzelnen Entwicklungen in diesem Projekt können auch einzeln und für weitere Forschungsprojekte verwendet werden. Damit kann die F&E-Qualität erhöht werden.

6 Schlussfolgerungen

6.1. Erkenntnisse

Augmented Reality wird langfristig die gesamte Baubranche nachhaltig verändern. Die Anwendungs- und Anforderungsanalyse (Urban et al., 2019; Schranz et al., 2020) zeigte, dass die Technologie im gesamten Lebenszyklus eines Bauprojekts Anwendung findet. Je nach Anforderungen an die Hard- und Software wird die Technologie in unterschiedlicher Geschwindigkeit massentauglich sein. Die Projektergebnisse haben für die gesamte Baubranche Relevanz, aber vor allem für ausführende Unternehmen sind die erarbeiteten Ergebnisse besonders interessant. Anhand der durchgeführten Entwicklungen und Tests in diesem Projekt können Bauunternehmen einschätzen, was die Technologie derzeit kann und wo diese in Zukunft eingesetzt werden kann. Die einzelnen Entwicklungen/Ergebnisse in diesem Projekt können auch einzeln und für weitere Forschungsprojekte verwendet werden. Im Projekt *AR-AQ-Bau* entwickelte das Forschungsteam ein *fortschrittliches, baustellentaugliches AR-System zur Abnahme und Qualitätskontrolle auf Baustellen*.

Die in aktuellen AR-Brillen eingesetzten Tracking-Lösungen (oft SLAM) sind bereits relativ weit entwickelt und in vielen Situationen des Anwendungsfalls ausreichend. Unter schwierigen Bedingungen können die Tracking-Ergebnisse aber mit den erforschten Methoden durchaus verbessert werden. Insbesondere das laserprojektionsbasierte Tracking und Tracking (-verbesserungen) basierend auf dem BIM-Modell zeigen hier großes Potential. Die automatische Erkennung von Veränderungen ist mit den Daten und der Rechenleistung der AR-Brille möglich. Limitierende Faktoren stellen aber sowohl Auflösung als auch die Leistung der Mobilprozessoren dar.

Der Closed-Loop-BIM-Datenaustausch ermöglicht die Einbindung von AR in den digitalen openBIM-Bauprozess. Außerdem verbessert dieses System den Einsatz von BIM auf der Baustelle und erhöht den Nutzen von BIM im gesamten Lebenszyklus (z.B. QR-Code → IFC-referenzierte Wartungsdaten). Die Tests zeigten, dass AR hier keine bestehenden Tools ersetzt, sondern vielmehr eine komplett andere Arbeitsweise erlaubt und bestehende Arbeitsschritte im Hinblick auf Effizienz signifikant verbessern kann. Im Falle der Abnahme sind mehrere Personen über längere Zeit mit dem Dokumentieren von Fehlstellen beschäftigt (z.B. Fotos von Fehlstellen aufnehmen und in Kombination in Tabellen und Skizzen eintragen). Da die Aufzeichnungen vor Ort entstehen, jedoch nicht alle notwendigen Details vor Ort eingetragen werden können, wird das erstellte Material im Büro nachbearbeitet, aufgelistet, kategorisiert und dokumentiert (Fotos nummerieren, Fehlstellen markieren etc.). AR ist eine Technologie, die die Vorteile von BIM auf die Baustelle bringt. Viele Prozesse können vereinfacht und optimiert werden (Wegfall von Medienbrüche). Das in diesem Projekt entwickelte fortschrittliche AR-System für die Abnahme von HKLS-Systemen im Bereich der Haustechnik ist hierzu ein wichtiger Schritt (Proof of Concept). Weitere Entwicklungen aufbauend auf diesem System können den breitflächigen Einsatz von AR im Bauwesen vorantreiben.

Neben den vor dem Projekt prognostizierten Einsparungen an Schadstoffen durch die Vermeidung nicht mehr notwendiger Fahrten auf die Baustelle zeigten sich während der COVID-19-Pandemie weitere Vorteile im Einsatz von AR. Das Remote-Expert-System erlaubt die Zuschaltung von Expert:innen aus der Ferne, weshalb bei Inspektionen vor Ort weniger Personal direkt auf der Baustelle erforderlich ist und Anreisen reduziert werden können.

Die im Projekt entwickelten Prototypen sind vor allem ein *Proof of Concept* und noch nicht marktreif. Es fehlt noch an entsprechender Zuverlässigkeit und Usability vor allem auf der Hardwareseite (verbesserte Gestik-Erkennung, Prozessleistung, AR-Brille) und anderen Randbedingungen (Internet-Verfügbarkeit auf Baustellen). Die hohen Investitionskosten sind ebenfalls noch ein Hemmnis für die breite Anwendung.

6.2. Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten

FCP hat sich im Rahmen des Projekts auf die Überprüfung der Baustellentauglichkeit sowie die Erforschung des Potentials für die Abnahme unter möglichst realen Bedingungen gekümmert. FCP plant gemeinsam mit den Projektpartnern, insbesondere ARIOT, eine Fortführung des Projekts und eine Überführung der Prototypen zur Marktreife. Für den Projektpartner ARIOT sind eine Reihe von Verwertungsmöglichkeiten gegeben. Es ist geplant, aus dem Forschungsprojekt heraus ein Softwareprodukt zur Marktreife zu entwickeln, das Ingenieurbüros, Bauunternehmen und Facility-Management-Dienstleister bei der Verbesserung ihres Informationsmanagements und der Kommunikationsprozesse unterstützt.

Im Zuge des Forschungsprojektes wurden zahlreiche Expert:innen-Interviews, Vorträge und Workshops durchgeführt (siehe Kapitel 4). Der Fokus der Interviewpartner lag auf Unternehmen, welche in der Ausführung tätig waren. Im Rahmen des Projektes wurde drei Diplomarbeiten, vier Bachelorarbeiten und wissenschaftliche Arbeiten verfasst:

- Wissenschaftlicher Artikel: *Digitalisierung in der Bauindustrie - Status Quo, Vision, Potenziale und Voraussetzungen*; Bauingenieur – Organzeitschrift der VDI-Gesellschaft Bautechnik, Jahrgangsausgabe 2019/20 (2019), S. 115–123.
- Wissenschaftlicher Artikel: *Augmented Reality im Bauwesen: Teil 1 - Anwendungs- und Anforderungsanalyse*; Bauingenieur, 95 (2020), 10; S. 379–388.
- Wissenschaftlicher Artikel: *Augmented Reality im Bauwesen: Teil 2 - Baustellentaugliches Trackingsystem*; Bauingenieur, 95 (2020), 12; S. 501 - 508.
- Zeitungsbeitrag: *Die Bauaufsicht mit der Datenbrille*; Die Presse, 17.08.2019
- Wissenschaftlicher Artikel: *BIM auf Baustellen mit Augmented Reality*; Bauaktuell, 10 (2019), 5; S. 192–196.
- Konferenzvortrag mit Artikel: *Construction 4.0: A Roadmap to Shaping the Future of Construction*; Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020).
- Konferenzvortrag mit Artikel: *A Comprehensive Map for Integrating Augmented Reality During the Construction Phase*; Proceedings Creative Construction e-Conference 2020
- Die "Digitale" Örtliche Bauaufsicht - Prozessoptimierung anhand zweier Forschungsprojekte; 29. BBB-Assistententreffen.
- Wissenschaftlicher Artikel: *A comprehensive map for integrating augmented reality during the construction phase*; OTMC, accepted for publication.

Ein weiteres Paper ist gerade in Begutachtung und drei weitere Artikel in Bearbeitung. Die Projektpartner planen, das erlangte Wissen in einem weiteren gemeinsamen F&E-Projekt weiter zu nutzen. In einem folgenden Forschungsprojekt soll AR in Zusammenspiel mit Robotik und KI für die Bestandsaufnahme genutzt werden.

7 Ausblick und Empfehlungen

Weiterentwicklung der Prototypen:

Die im Projekt entwickelten Prototypen sind vor allem ein *Proof of Concept* und noch nicht marktreif. Sie zeigen aber das Potenzial und die Möglichkeiten von AR in Kombination mit openBIM im Bauwesen. Die Projektpartner, insbesondere ARIOT, planen daher auch nach dem Projektende die Prototypen weiterzuentwickeln und eine Überführung der Prototypen zur Marktreife.

Forschungsbedarf:

Die Entwicklungen dieses Forschungsprojekts (baustellentaugliches Tracking-System, Closed-Loop BIM Exchange Service und Remote-Expert-System) und die gleichzeitig praxisnahe Tauglichkeitsprüfung von AR auf Baustellen bewährte sich über die gesamte Projektlaufzeit. Dies fördert eine direkte Einbindung des entwickelten, digitalen Bauprozesses in die Praxis. Um die Digitalisierung des Bauprozesses schnell voranzutreiben, müssen Forschung und Entwicklung weiter durch Anwendungsstudien unter Einbeziehung von Techniker:innen aus der Praxis validiert werden. Dies sollte vor allem über konkrete Pilotprojekte erfolgen.

Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten:

- **Augmented Reality und KI:**
Im vorliegenden Projekt erfolgte die Abnahme mittels AR und ermöglichte dadurch die Rückführung von Abweichungen direkt in das BIM-Modell. Die Eingabe und Zuweisung von Abweichungen (Modell/Realität) erfolgte durch Gestik – also manuell. In weiteren Forschungsprojekten sollte nun ein KI-Algorithmus entwickelt werden, der diese Abweichungen zwischen Modell und Realität automatisch erkennt. AR-Anwender:innen sollten dann nur noch diese Auswahl bestätigen müssen. Auch die Übertragung von Informationen mittels QR-Code/RFID kann dadurch automatisiert werden.
- **Wartungsräume:**
Mittels AR können nicht nur reale Objekte mit den geplanten Objekten, sondern auch mit fiktiven Objekten z.B. Wartungsräume abgeglichen werden. Die Darstellung von modellierten Wartungsräumen stellt einen erheblichen Mehrwert für den Betrieb dar. Das Modellieren von Wartungsräumen in openBIM und deren Darstellung mittels AR sind daher wichtige Forschungsfelder.
- **Internetsysteme:**
Für ein funktionstüchtiges Remote-Expert-System ist eine zuverlässige und schnelle Netzwerkverbindung auf Baustellen unumgänglich. Dies ist eine der größten Herausforderungen – nicht nur für AR. Im Zuge von Forschungsprojekten sollten die Notwendigkeit, die Möglichkeiten und die Kosten/Nutzen von Internetsystemlösungen auf Baustellen evaluiert werden, damit die Digitalisierung auf Baustellen weiter voranschreitet.
- **Baustellensicherheit:**
In Zukunft werden vermehrt AR-Brillen zum Einsatz kommen. Dies kann einerseits durch Ablenkung zu einem erhöhten Unfallrisiko führen, andererseits ermöglicht es auch die holografische Darstellung von Gefahren auf der Baustelle. Diese konträren Punkte sollten im Zuge von Baustellentests evaluiert werden, um den Einsatz von AR weiter voranzutreiben.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zwei Beispiele für die komplexe Haustechnik aus Pilotprojekten in BIM.....	10
Abbildung 2: DAQRI Smart Glasses (li.), DAQRI Smart Helmet (re.) (DAQRI, 2020).....	11
Abbildung 3: AR-synchronisierte Darstellung (li.), Kollisionskontrolle (re.) von der Firma FCP.....	12
Abbildung 4: Derzeitiger Datenfluss „Dateneinbahn“ in Revit und Ariot	12
Abbildung 5: Interaktionsmöglichkeiten für die Expert:innen (DAQRI – Projektpartner)	15
Abbildung 6: Laserprojektions-Hardware bestehend aus Lasermodul und optischen Elementen.....	20
Abbildung 7: Mockup der Dateneingabe im AR.....	25
Abbildung 8: Entwickelter Menüpfad für das AR-Abnahmetool inkl. Priorisierung	25
Abbildung 9: IFC-Mängelklassifizierung	26
Abbildung 10: Umgesetzter Closed-Loop-BIM-Exchange-Service (Dashboard, AR-Anwendung).....	29
Abbildung 11: Benutzeroberfläche für den Projektzugriff	29
Abbildung 12: Auswahl eines Verfahrens zur Ursprungssynchronisation	31
Abbildung 13: Auswählen eines Ursprungspunkts und Definieren einer Richtung (HoloLens 2): 3D-Modell (links) und Reale Umgebung samt Scan (rechts)	32
Abbildung 14: Einstellen der Position eines einzelnen ausgewählten Ifc-Elements.....	32
Abbildung 15: Definition von drei orthogonalen Ebenen (links) im BIM-Modell und (Mitte) in der realen Welt. (rechts) Transformation des BIM-Modells in den realen Raum (blaue Gitter-Textur).....	33
Abbildung 16: Darstellung des Interaktionsmenüs im Prototyp.....	33
Abbildung 17: Test der Abweichungen des „Drift“ im Scan bei Fehlen zusätzlicher Features	35
Abbildung 18: Testen des Tracking-System auf der Baustelle	35
Abbildung 19: Überblick Baustelle (li.), Überlagerung Scan mit dem BIM-Modell (re.)	36
Abbildung 20: Tests der Trackinggenauigkeit: Kamera wird mit einem Roboterarm bewegt.....	36
Abbildung 21: Ergebnisse der Trackinggenauigkeit mit Kameraposen, die von einem Roboterarm angesteuert wurden	37
Abbildung 22: Laserprojektor (links) in der simulierten Einsatzumgebung Parkgarage. HoloLens 2 mit aufgesetzter Trackingkamera auf Stativ (rechts).	37
Abbildung 23: Trackingdaten des Laserprojektionstracking (blau) und der HoloLens 2 (rot): Person bewegt sich in einer Parkbox der Parkgarage und inspizierte die HKLS-Installationen (links) sowie Person bewegt sich mit je einem Schritt nach rechts und vorne und wieder zurück (rechts)	38
Abbildung 24: 3D Rekonstruktion der Szene überlagert mit BIM-Modell (links). Mit dem BIM-Modell basierte Verbesserung der Trackingpose (rechts).....	39
Abbildung 25: Darstellung Interface erstes Remote-Expert-System	40
Abbildung 26: Interface des Assist Prototypen inkl. Video aus Sicht der DAQRI AR-Brille inklusive aller Elemente, welche auch für die Träger:innen der AR-Brille sichtbar sind (in diesem Fall das Video des Remote Expert).....	40

Abbildung 27: Visualisierung der 3D-Rekonstruktion auf den DAQRI AR-Brille (links) und die übertragenen geometrischen Daten nach Abschluss der Rekonstruktion (rechts)	41
Abbildung 28: Remote-Expert-System: Beispiel für die Markierung zu kontrollierender Stellen und Einblenden zusätzliche Informationen (weißes Erklärbild rechts).....	42
Abbildung 29: Remote-Expert-System-Architektur.....	42
Abbildung 30: Interaktion Audio/Video und Hologramme	43
Abbildung 31: Interaktion PostIT (links); 3D-Scan und Translation (rechts)	44
Abbildung 32: Change Detection, die mit der Farbe Rot Änderungen relativ zu einem vorherigen Scan hervorhebt (unterlegt mit dem BIM-Modell).....	45
Abbildung 33: Remote-Expert-System zur Unterstützung vor Ort: Ansicht des Remote-Expertens und HMD-Nutzers (links) und Ansicht Remote-Expert-Scan (rechts) (Versuchsstand TU Wien).....	45
Abbildung 34: Remote-Expert-System Test	46
Abbildung 35: Versuche in der Baustelle Tiefgarage FCP: verschiedene Nutzer:innen sowie AR-Menü zur Fehlermarkierung (unten rechts)	47
Abbildung 36: Versuche auf der Baustelle der Wiener Linien: Anordnung der Mängel inkl. Aufzeichnungsrouten – Ansicht und Grundriss (oben); Bild der Ansicht (unten links); AR-Menü zur Mängelaufnahme (unten rechts)	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mögliche Verbesserung bei der AR-HKLSE-Abnahme	23
Tabelle 2: Evaluierung erforderlicher Funktionen (Werkzeuge).....	27

Literaturverzeichnis

- Accenture GmbH: Digitalisierung entzaubern – wie die deutschen Top500 digitale Blockaden lösen. Studie, 2016.
- Alsafouri S., und Ayer S.K.: A Step-By-Step Procedure for Implementing Mixed Reality Visualization Interfaces in Design and Constructability Review Sessions. In: LC3 2017: Volume I – Proceedings of the Joint Conference on Computing in Construction (JC3), S. 913–921, 2017.
- Apple Inc.: ARKit. <https://developer.apple.com/arkit/> (abgerufen am 21. Februar 2018; 11:15).
- Azuma R., Baillet Y., Behringer R., Feiner S., Julier S. und MacIntyre B. (2001). Recent advances in augmented reality. In: IEEE computer graphics and applications, 21(6), 34–47, 2001.
- CaddForce: CaddForce – BIM Cloud Solution Provider. <https://caddforce.com> (abgerufen am 01. Februar 2018; 12:00).
- Chen H., Lee A.S., Swift M. und Tang J.C.: 3D Collaboration Method over HoloLens and Skype End Points. In: Proc. of the 3rd Int. Workshop on Immersive Media Experiences, S. 27–30, 2015.
- Chi H.L., Kang S.C. und Wang X.: Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction. In: Automation in Construction, 33, S. 116–122, 2013.

- Chriti M.: Aufnahme des zeitlichen Arbeitsaufwandes und Ermittlung von Stundenaufwandswerten des technischen Führungspersonals bei Bauvorhaben im Bereich Tiefbau/Infrastrukturbau. Diplomarbeit, TU Wien, 2015.
- Coturn: coturn. <https://github.com/coturn/coturn> (abgerufen am 01. Oktober 2018; 08:00).
- Daqri: Worksense – Tools for the digital workforce. <https://daqri.com/worksense/> (abgerufen am : 09.März.2020).
- Das M., Cheng J.C.P. und Kumar S.: Social BIMCloud: a distributed cloud-based BIM platform for object-based lifecycle information exchange. In: Visualization in Engineering, 3(8), 2015.
- Delgado J.M.D., Oyedele L., Demian P. und Beach T.: A research agenda for augmented and virtual reality in architecture, engineering and construction. In: Advanced Engineering Informatics, 45, S. 101–122, 2020.
- El Jazzer M., Schranz C., Urban H., Nasserredine H.: Integrating Construction 4.0 Technologies: A Four-Layer Implementation Plan. In: Frontiers in Built Environment, 2021
- Eichler C., Schranz C., Kruschmann T., Urban H., Gratzl M.: BIMcert Handbuch Grundlagenwissen openBIM, 2021
- Eichler C., Schranz C., Kruschmann T., Urban H., Gratzl M., Gratzl G.: BIMcert Handbook (Austria Edition) Basic Knowledge openBIM, 2021
- Fenais A.S., Ariaratnam S.T., Ayer S.K. und Smilovsky N.: A review of augmented reality applied to underground construction. In: Journal of Information Technology in Construction, 25, S. 308–324, 2020.
- Fette I. und Melnikov A.: The WebSocket Protocol. <https://tools.ietf.org/html/rfc6455> (abgerufen am 21. Februar 2018; 11:20), 2011.
- Forster C., Pizzoli M. und Scaramuzza D.: Fast Semi-Direct Monocular Visual Odometry. In: Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 15–22, 2014.
- Garret J.J.: The Elements of User Experience. New Riders, Berkeley 2010.
- Gerger A., Schranz Ch. und Urban H.: Augmented-Reality-Uses-Cases im Bauwesen: Potentiale und Anforderungen. Forschungsbericht, Zentrum Digitaler Bauprozess, TU Wien, Wien 2019.
- Goger G., Piskernik M. und Urban H.: Studie: Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen. BMVIT und WKO, 52 S., Wien 2017.
- Nasserredine H., Wook Seo K., Rybkowski Z., Schranz C., Urban H.: Propositions for a Resilient, Post-COVID-19 Future for the AEC Industry. In: Frontiers in Built Environment, 2021
- Irschik T., Schranz Ch. und Urban H.: Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen von Augmented Reality im Bauprozess mit DAQRI Smart Glasses. Forschungsbericht, Zentrum Digitaler Bauprozess, TU Wien, Wien 2020.
- Katranuschkov P., Gehre A und Scherer R.J.: An ontology framework to access IFC model data. In: Proc. of the ITcon 8, S. 413–437, 2003.

- Khronos Group: OpenGL ES for the Web. <https://www.khronos.org/webgl/> (abgerufen am 21. Februar 2018; 11:00).
- Klein G. und Murray D.: Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces. In: Proc. of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), S. 225–234, 2007.
- Koch C., Neges M., König M. und Abramovici M.: BIM-based Augmented Reality for Facility Maintenance using Natural Markers. In: Proc. of the 2012 EG-ICE Int. Workshop on Intelligent Computing in Engineering, 2012.
- Li W., Nee A.Y.C. und Ong S.K.: A state-of-the-art review of augmented reality in engineering analysis and simulation. In: Multimodal Technologies and Interaction, 1(3), 2017.
- Lukosch S., Billingham M., Alem L. und Kiyokawa K.: Collaboration in Augmented Reality. In: Computer Supportet Cooperative Works (CSCW), 24, S. 515–525, 2015.
- Mossel A. und Kroeter M.: Streaming and Exploration of Dynamically Changing Dense 3D Reconstructions in Immersive Virtual Reality. In: Proc. of 2016 IEEE Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality ISMAR16, 2016.
- Microsoft: HoloLens 2. <https://www.microsoft.com/de-de/hololens/hardware> (abgerufen am 20. Dezember 2019)
- Mozilla: Using the Screen Capture API. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Screen_Capture_API/Using_Screen_Capture (abgerufen am 10. Dezember 2018; 13:00).
- Newcombe R.A., Izadi S., Hilliges O., Molyneaux D., Kim D., Davison A.J., Kohi P., Shotton J., Hodges S. und Fitzgibbon A.: KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking. In: Proc. of the 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, S. 127–136, 2011.
- Olson E.: AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system. In: Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, S. 3400–3407, 2011.
- Prisacariu V.A., Kähler O., Cheng M.M., Ren C.Y., Valentin J., Torr P.H.S., Reid I.D. und Murray D.W.: A Framework for the Volumetric Integration of Depth Images. <https://arxiv.org/abs/1410.0925> (abgerufen am 20. Februar 2018; 09:00), 2014.
- Rankohi S. und Waugh L.: Review and analysis of augmented reality literature for construction industry. In: Visualization in Engineering, 1(9), S. 1–18, 2013.
- Redmond A.M. und Smith B.: Exchanging Partial BIM Information through a Cloud-Based Service: testing the efficacy of a major innovation. In: Proc. of Innovation and the Built Environment Academy first annual conference IBEA, London South Bank University, UK, 2011.
- Reitmayr G., Langlotz T., Wagner D., Mulloni A., Schall G., Schmalstieg D. und Pan Q.: Simultaneous Localization and Mapping for Augmented Reality. In: Proc. of the 2010 International Symposium on Ubiquitous Virtual Reality, S. 5–8, 2010.

- Schönauer C., Vonach E., Gerstweiler G. und Kaufmann H.: 3D building reconstruction and thermal mapping in fire brigade operations. In: Proc. of the 4th Augmented Human International Conference (AH '13), ACM Press, New York, NY, USA, S. 202–205, 2013.
- Schranz Ch., Gerger A. und Urban H.: Augmented Reality im Bauwesen: Teil 1 – Anwendungs- und Anforderungsanalyse. In: Bauingenieur, 95(10), S. 379–388, 2020.
- Shin D.H. und Dunston P.S.: Identification of application areas for Augmented Reality in industrial construction based on technology suitability. In: Automation in Construction, 17, S. 882–894, 2008.
- Taguchi Y., Jian Y.-D., Ramalingam S. und Feng C.: Point-plane SLAM for hand-held 3D sensors. In: Proc. of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Deutschland, S. 5182–5189, 2013.
- Urban H., Irschik T., Schranz Ch. und Schönauer Ch.: Augmented Reality im Bauwesen: Teil 2 – Baustellentaugliches Trackingsystem. In: Bauingenieur, 95(12), S. 501–508, 2020.
- Urban H., Schranz Ch. und Gerger A.: BIM auf Baustellen mit Augmented Reality. In: Bauaktuell, 10, S. 192–196, 2019.
- Wagner D., Reitmayr G., Mulloni A., Drummond T. und Schmalstieg D.: Real-time detection and tracking for augmented reality on mobile phones. In: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 16(3), S. 355–368, 2010.
- Wang X., Kim M.J., Love P.E. und Kang S.C.: Augmented Reality in built environment: Classification and implications for future research. In: Automation in construction, 32, S. 1–13, 2013.
- Wang X. and Love P.E.D.: BIM + AR: Onsite information sharing and communication via advanced visualization. In: Proceedings of the 2012 IEEE 16th International Conference on Computer Supported Work in Design, S. 850–855, 2012.
- Whelan T., McDonald J., Kaess M., Fallon M., Johannsson H. und Leonard J.J.: Kintinuous: Spatially Extended KinectFusion. In: Proc. Of Robotics: Science and Systems (RSS'12) Workshop on RGB-D: Advanced Reasoning with Depth Cameras. Boston, MA, USA, 2012.
- Yang X., Guo J., Xue T. und Cheng K.-T.: Robust und real-time pose tracking for augmented reality on mobile devices. In: Multimedia Tools and Applications, 77, S. 6607–6628, 2018.
- Zhou Y., Luo H. und Yang Y.: Implementation of augmented reality for segment displacement inspection during tunneling construction. In: Automation in Construction, 82, S. 112–121, 2017.
- Zillner J., Mendez E. und Wagner D.: Augmented Reality Remote Collaboration with Dense Reconstruction. In: Proc. of the 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct), München, Deutschland, S. 38–39, 2018.

Links:

<https://www.ibb.tuwien.ac.at/zdb2/ar-aq-bau/>

<https://www.researchgate.net/lab/Centre-for-Digital-Building-Processes-Christian-Schranz>

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)