

Entwicklung und Validierung eines AR-Abnahmetools für die örtliche Bauaufsicht am Beispiel der Technischen Gebäudeausrüstung

H. Urban, N. Breitschopf, Ch. Schranz

ZUSAMMENFASSUNG Die Digitalisierung der Bauwirtschaft bringt neben Building Information Modeling (BIM) auch zahlreiche andere neue Technologien auf die Baustelle. Eine sehr vielversprechende Technologie ist Augmented Reality (AR). Die Visualisierung des 3D-BIM-Modells kann die Prozesse auf der Baustelle unterstützen und effizienter gestalten. Im Forschungsprojekt AR-AQ-Bau beschäftigten sich die Autoren mit der Entwicklung eines AR-Abnahmetools für die Kontrolle der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) durch die Örtliche Bauaufsicht (ÖBA). Die Entwicklung erfolgte auf Basis der Ansprüche von ÖBA-Experten an das AR-Abnahmetool. Zahlreiche Baustellenversuche mit Experten als Testpersonen dienten der Validierung dieses AR-Abnahmetools. Diese Versuche sollten zeigen, ob und bei welchen Aufgaben die AR-unterstützte TGA-Abnahme effizienter als eine konventionelle TGA-Abnahme ist und wie diese AR-Unterstützung von den Experten aufgenommen wird. Dieser Artikel beschreibt die Entwicklung des AR-Abnahmetools sowie die Validierung anhand von Baustellenversuchen.

STICHWÖRTER

Forschung und Entwicklung, Bauinformatik, Digitale Methoden

1 Einleitung

Mit der fortschreitenden Digitalisierung halten immer mehr neue Technologien Einzug ins Bauwesen. Dazu gehören zum Beispiel Augmented Reality, Virtual Reality, Robotik, 3D-Druck, Künstliche Intelligenz und Drohnen [1]. Die verstärkte Digitalisierung der Bauindustrie wird auch als Construction 4.0 zusammengefasst [2], [3]. Der Begriff Construction 4.0 weist dabei auf die immer größere Vernetzung zwischen den einzelnen Technologien hin [4]. Im Zentrum steht das BIM-Modell, das vielfältige Potenziale sowohl in der Bauphase [5] als auch der Betriebsphase [6] aufweist. Jedoch ist der direkte Zugang zu BIM-Informationen auf der Baustelle schwierig. Daher erweist sich eine Kombination von BIM mit Augmented Reality (AR) als besonders günstig [7], [8]. AR gehört zu den Mixed Realities in Milgrams Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum [9], [10] und ist durch die Visualisierung virtueller Elemente und Modelle in einer realen Umgebung gekennzeichnet. Somit eignet es sich besonders für Baustellen [11], [12], [13].

Development and validation of an AR acceptance tool for local building supervision using the example of technical building equipment

ABSTRACT In addition to Building Information Modeling (BIM), the digitalisation of the construction industry is also bringing various other new technologies to the construction site. One very promising technology is augmented reality (AR). The visualisation of the 3D BIM model can support the processes on the construction site and make them more efficient. In the research project “AR-AQ-Bau”, the authors deal with the development of an AR acceptance tool for the inspection of technical building equipment (TGA) by the local construction supervision (ÖBA). The development was based on the demands of building inspection experts on the AR acceptance tool. Numerous construction site tests with experts as test persons served to validate this AR acceptance tool. These tests were to show whether and for which tasks the AR-supported building services acceptance is more efficient than a conventional building services acceptance and how this AR support is received by the experts. This article describes the development of the AR acceptance tool and its validation on the basis of construction site tests.

Gemeinsam mit einem interdisziplinären Forschungsteam beschäftigten sich die Autoren im Forschungsprojekt „AR-AQ-Bau“ (Einsatz von Augmented Reality zur Abnahme und Qualitätssicherung auf Baustellen) mit der Weiterentwicklung von AR für den Einsatz auf Baustellen [14]. Einer Anwendungs- und Anforderungsanalyse [15] folgten Untersuchungen zur Verbesserung der Verortung virtueller Modelle im Baustellenumfeld [16] und die Entwicklung von Anwendungstools. Diese AR-Tools sollen zur Steigerung der Effizienz auf der Baustelle und der Bauqualität führen. Die Anwendungsanalyse zeigte, dass besonders die Örtliche Bauaufsicht (ÖBA) Interesse am und Erwartungen an den Einsatz von AR auf Baustellen hat.

Die ÖBA führt regelmäßig Abnahmen zur Kontrolle der ordnungsgemäßen Leistungserbringung durch. Diese kontinuierlichen Abnahmen sind entscheidend für den Projekterfolg. Je später Mängel (z. B. Beschädigungen, falsche Montage oder fehlende Bauteile) gefunden werden, desto größer ist der negative Einfluss auf Kosten, Termine und Qualität (Langlebigkeit). Die Aufnahme von Mängeln und die Kontrolle des Leistungsfortschritts erfolgen

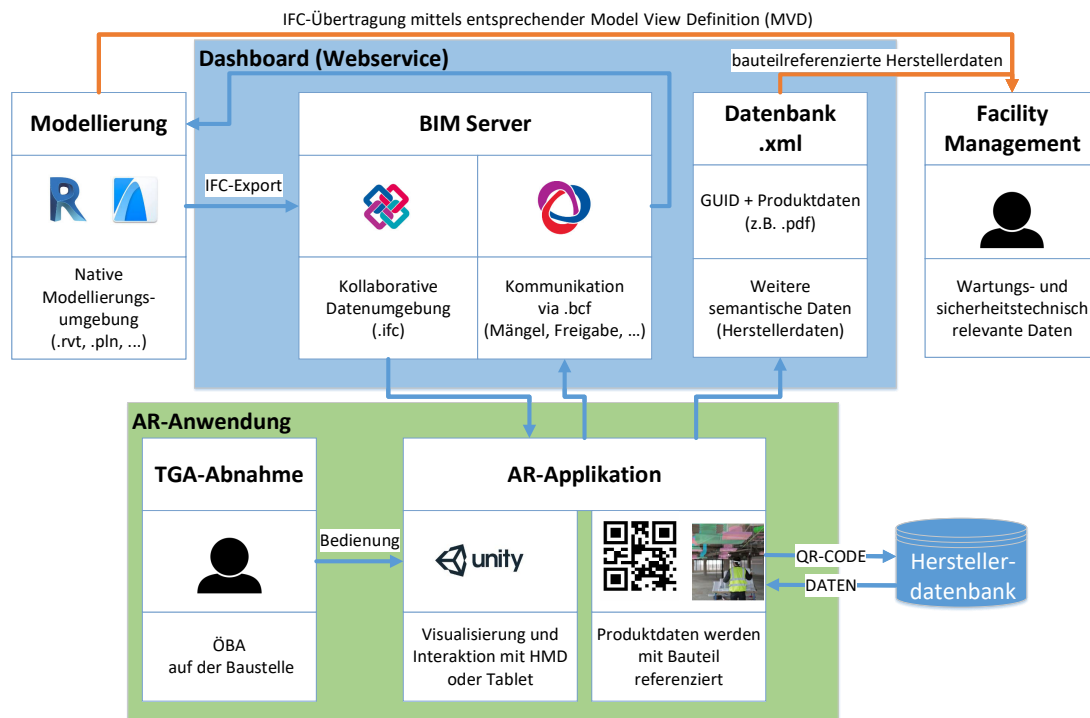


Bild 1. Geschlossene Datenkommunikation für das AR-Abnahmetool
 Grafik: Urban, Gerger, Schranz
 Fig. 1. Closed loop data transfer for the AR control and acceptance tool
 Source: Urban, Gerger, Schranz

derzeit zum größten Teil durch händische Dokumentation und Sprachaufnahmen während der Baustellenbegehung. Auf der Baustelle kommen jedoch bereits vermehrt Softwarelösungen zum Einsatz, welche die händische Eingabe von Mängeln und Kommunikation über ein Tablet auf einen 2D-PDF-Plan ermöglichen. Diese Aufnahme hat jedoch auf der Baustelle Grenzen, die beispielhaft im Folgenden kurz angeführt werden.

Arbeitssicherheit

Durch die Verwendung von Smartphone oder Tablet für Mängelzeichnung ist die Wahrnehmung der Umgebung oft eingeschränkt. Der Fokus richtet sich auf das Gerät in der Hand, die Umgebung wird wesentlich weniger wahrgenommen. Durch Halten der Tablets sind die Hände auf der Baustelle wesentlich eingeschränkt. Die Verwendung von Tablets oder Smartphones führen daher zu einer höheren Gefahr auf Baustellen.

2D-Plandarstellung

Die technische Gebäudeausrüstung ist gerade im Technikraum komplex und die reine Darstellung in 2D-Plänen kann zu Fehlern bei der Ausführung führen. Die ÖBA hat ebenfalls Probleme, den Überblick zu behalten. Häufig betreut die ÖBA nicht nur ein Projekt, sondern mehrere Projekte gleichzeitig. Dabei muss sie bei jedem Wechsel zwischen den Projekten umdenken. Dies erhöht die Gefahr, dass Planungsfehler oder Ausführungsfehler durch die reine 2D-Darstellung übersehen werden. Eine modellbasierte Planung (BIM-Methode) und Abnahme kann daher für die ÖBA sehr unterstützend sein.

Building Information Modeling

Die BIM-Planung schreitet in den letzten Jahren stärker voran. Durch diesen methodischen und technologischen Fortschritt

steht die ÖBA vor neuen Herausforderungen. Bei der Verwendung von BIM müssen derzeit die Problemfälle vom 2D-Plan ins BIM-Modell mit der dazugehörigen Verortung eingetragen werden. Die Kommunikation läuft derzeit basierend auf 2D-Plänen und Listen und nicht auf Modellbasis ab.

Durch den stärkeren Einsatz von BIM im Bauwesen stellt sich die Frage, wie die modellbasierte Kommunikation und das Mängelmanagement in Zukunft durchgeführt werden können und der derzeitige Medienbruch zwischen der 2D-Mängelzeichnung und dem BIM-Prozess geschlossen werden kann. Augmented Reality in Form von AR-Brillen (auch Head Mounted Displays genannt) könnte eine dieser Schlüsseltechnologien sein, die den Einsatz von BIM direkt auf Baustellen fördert [15], [17]. Die Möglichkeiten von AR für die Inspektion auf der Baustelle wurde schon vor Jahren erkannt und dann erweitert, zum Beispiel [18], [19], [20], [21].

Ein wichtiger Bestandteil nach Fertigstellung des Bauwerks wiederum ist die technische Gebäudeausrüstung (TGA). Daher stellt dieser Artikel ein entsprechendes AR-Abnahmetool für die TGA-Abnahme der ÖBA vor und untersucht die Effizienz dieses AR-Abnahmetools. Dabei vergleichen die Autoren die konventionelle TGA-Abnahme mit einer AR-unterstützten TGA-Abnahme. Die Darstellung der Erprobung dieses neuen AR-Abnahmetools, die Analyse der aufgezeichneten Daten (Dauer, Nutzerzufriedenheit) und die Untersuchung der Praxistauglichkeit sind das Ziel dieses Artikels.

2 Methodik

Zur Entwicklung des AR-Abnahmetools für die ÖBA führten die Autoren zunächst eine Literaturstudie durch. Dabei wurden Anwendungsmöglichkeiten von und Anforderungen an AR im Bauwesen ermittelt [15]. Darauf aufbauend erfolgte die Evaluierung der derzeitigen ÖBA-Prozesse im Bauwesen und die Definition der konkreten Anforderungen an die Softwareentwicklung

für das TGA-Abnahmetool [22]. Im Zuge der Softwareentwicklung wurde das Tool kontinuierlich durch die Autoren getestet [23].

Baustellenversuche mit ÖBA-Experten als Testpersonen dienen abschließend der Validierung des AR-Abnahmetools. Die ermittelten ÖBA-Prozesse [22] bildeten die Grundlage für die ausgewählten Aufgabenstellungen. Die Aufgaben sollten die häufigsten Tätigkeiten direkt auf der Baustelle abdecken. Diese können jedoch nicht das gesamte Tätigkeitsfeld der ÖBA abdecken. Sie sollen vielmehr zeigen, ob und bei welchen Aufgaben die AR-unterstützte TGA-Abnahme effizienter als eine konventionelle TGA-Abnahme sein kann und wie diese AR-Unterstützung von den ÖBA-Experten aufgenommen wird. Die Versuche erfolgten unter klar definierten Rahmenbedingungen, um den Einsatz von AR aufgrund der derzeitigen Hard- und Softwarelimitierung zu ermöglichen [15], [16]. Diese Validierung dient als Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem Themenbereich.

3 Augmented-Reality-Abnahmetool

Das Forschungsprojekt „AR-AQ-Bau“ [14] beschäftigte sich mit der Entwicklung, dem Einsatz und der Validierung eines Prototyps für die ÖBA-Abnahme mittels AR. Der entwickelte Prototyp stellte dabei einen Proof of Concept dar und soll die Potenziale und die noch zu überwindenden Herausforderungen von AR im Bauwesen aufzeigen. Eine Validierung des Prototyps auf Baustellen bildete daher einen wesentlichen Bestandteil des Forschungsprojekts. Dieses Kapitel widmet sich zuerst den Zielen und funktionalen Anforderungen an ein AR-Abnahmetool, bevor es das daraus entwickelte User-Interface beschreibt. Im nächsten Kapitel folgen der Versuchsaufbau und danach die Diskussion der Ergebnisse.

3.1 Ziele und funktionale Anforderungen an ein AR-Abnahmetool

Nach einer Anwendungs- und Anforderungsanalyse für AR im Bauwesen [15], [16] und der Erhebung der derzeitigen ÖBA-Prozesse folgte die Identifikation möglicher Optimierungspotenziale mittels AR, welche in Haponiuk [22] aufgelistet sind. Die drei Kernziele der Optimierung sind:

- Effizienzsteigerung des ÖBA-Prozesses auf der Baustelle,
- Effizienzsteigerung der Folgeprozesse (Nachbearbeitung) und
- Erhöhung der Bauqualität (durch einfacheres und früheres Entdecken von Mängeln).

Diese Kernziele wurden in Teilziele untergliedert (Tabelle 1). Damit konnten die Anforderungen an das AR-Abnahmetool definiert und die Entwicklung des Prototyps gestartet werden.

Eine wichtige Anforderung für die Erreichung der Ziele ist ein geschlossener Datenkreislauf. Bild 1 zeigt diese geschlossene Datenkommunikation [15], [24] zwischen AR-Brille und BIM-Modell. Das Modell wird über ein Webservice als IFC-Datei projektbezogen auf den BIM-Server hochgeladen. Die Modelle können über die AR-Anwendung auf der AR-Brille (HMD) abgerufen und in AR dargestellt werden. Über eine Datenkommunikation erfolgt die Informationsübergabe (z.B. Mängeleingabe) in Form von Kommentaren, Bildern sowie anderen semantischen Informationen in das BIM-Modell mittels dem BIM Collaboration Format (BCF). Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten zur Erfas-

Tabelle 1. Definition der Ziele und Anforderungen an das AR-Abnahmetool
Table 1. Definition of goals and requirements for the AR control and acceptance tool

Ziele für das AR-Abnahmetool	Funktionalitäten des AR-Tools
Softwareunabhängiger, modellbasierter Datenaustausch	Einsatz von openBIM (IFC-Standard); bidirektionaler Datenaustausch
Laufend aktueller Stand der Pläne	Verknüpfung mit IFC-Datei; bidirektionaler Datenaustausch
Beschleunigung der Mängelerfassung	Verknüpfung mit IFC-Datei; halbautomatischer Prozess der Mängelprotokollierung; Standardliste an Mängeln; Hinzufügen von Zusatzinformationen zu Mängeln
Visuelle Überlagerung von Modellen mit Bestand	Automatische Verortung; Verknüpfung mit IFC-Datei; Layering-Funktion
Informationen über jedes TGA-Element direkt verfügbar	Verknüpfung mit IFC-Datei; Bauteilinformation-Funktion
Kollisionen zwischen bestehenden und zu installierenden Elementen identifizierbar	Messfunktion; Unterteilung der Pläne in Layer; Erkennung der freizuhaltenden Bereiche
Angabe der Position bereits festgestellter Mängel	Darstellung eingegebener Mängel; Radar-Funktion (Richtungserkennung)
Zuweisung von Fotos zum zugehörigen Mangel	Fotofunktion mit Verortung; Scan-Funktion
Teilautomatische Erfassung der Herstellerdaten und Zuordnung zum virtuellen Bauteil	Einlesen von QR-Code und Zuweisung zum IFC-Modell

sung des Baufortschritts sowie von Herstellerdaten wartungsrelevanter Bauteile (z.B. Brandschutzklappen). Dies soll bei der Erstellung eines As-built-BIM-Modells für den Betrieb (Facility Management) helfen, da dann genauere Informationen über die eingebauten Bauteile vorhanden sind. Dazu muss das AR-Abnahmetool neben den geometrischen Informationen und dem Status der Freigabe (bei der Abnahme) noch weitere alphanumerische Informationen aufnehmen können (z.B. die Daten der eingebauten Produkte).

Über die AR-Brille nimmt die ÖBA mittels QR-Codes oder RFID-Chip Informationen zu den Bauteilen auf und referenziert diese mit dem BIM-Modell. Damit stehen dem Facility-Management wartungs- und sicherheitstechnisch relevante Informationen in der Betriebsphase zur Verfügung.

3.2 User Interface für das AR-Abnahmetool

Entsprechend der zuvor definierten Anforderungen programmierte der Projektpartner ARIOT das User-Interface des AR-Abnahmetools. Das Hauptmenü der Applikation ist das zentrale Navigationselement des Prototyps. Die Benutzer wählen die wichtigen Funktionen über das Hauptmenü aus (Bild 2, links): Select (Auswählen), Defect (Mängel), Measure (Messen), Layers, AdjustPosition (Position korrigieren) und Minimap.

Mit der Funktion Select (a) wählen die Benutzer Bauteile oder Mängel (durch farbigen 3D-Pin gekennzeichnet) aus und rufen zugehörige Informationen ab. Mit Defect (b) können neue Mängel modellbasiert verortet werden. Die Positionierung von 3D-Annotationen hat sich in Studien als besonders effektiv erwiesen [25]. Nach Platzieren und Auswahl eines Mangels er-

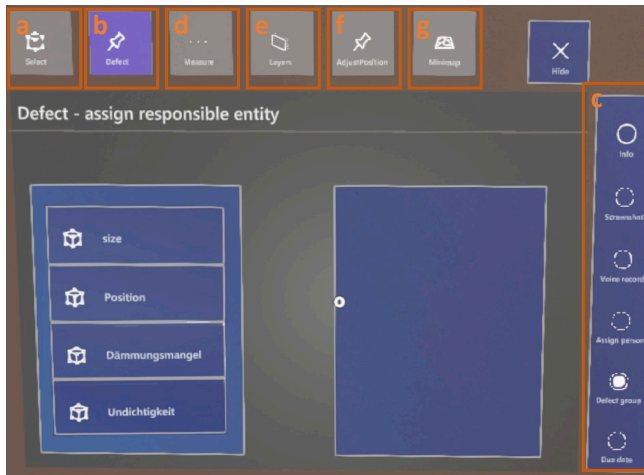


Bild 2. Funktionen AR-Abnahmetool Hauptmenü und Mängelmenü (links, Screenshot aus Microsoft HoloLens 2);

Testperson steuert AR-Abnahmetool per Finger (rechts) Grafik/Foto: ARIOT (links), Urban (rechts)

Fig. 2. Functions of the main menu and the defects menu of the AR control and acceptance tool (left, screenshot from Microsoft HoloLens 2); test person controls AR app with their fingers Source: ARIOT (left), Urban (right)



Bild 3. Überlagerung des AR-Modells mit der Verrohrung (roter Pin markiert Mangel), Screenshot aus Microsoft HoloLens 2 Grafik: Breitschopf

Fig. 3. Overlay of the AR model with the pipework (red pin marks defect), screenshot from Microsoft HoloLens 2 Source: Breitschopf

scheint das Mängelmenü (c). Hier steuern die Benutzer alle Aktionen zur Mängelzeichnung (Datum, Verantwortlichkeit sowie IFC-Entity-bezogene, standardisierte Mängelvorauswahl) und ordnen ihnen Informationen, Audiokommentare, Fotos und ev. QR-Codes zu. Die Funktion Measure (d) ermöglicht das Messen zwischen realen Punkten, aber auch zwischen realen und virtuellen Punkten (z.B. reale Rohdecke und virtuelle Leitungsführung). Dies ermöglicht die Überprüfung, ob Mindestabstände der geplanten Elemente mit der realen Baustelle eingehalten werden. Abweichungen zwischen Modell und Baustelle sowie deren Auswirkungen können dadurch frühzeitig erkannt werden. Mit der Funktion Layer (e) blenden Benutzer Mängeltypen und Elementgruppen ein und aus. Die nachträgliche Kalibrierung der Modellpositionierung erfolgt über die Funktion AdjustPosition (f). Die Minimap (g) stellt die Live-Position des Nutzers im Grundriss des BIM-Modells dar. Das Hauptmenü wird durch das Hochhalten der offenen Hand aufgerufen und kann mit der Bewegung der Hand verschoben werden. Die Auswahl der Funktionen erfolgt direkt mittels Fingertracking (Bild 2, rechts).

4 Praxisnahe Tests samt Validierung

4.1 Setup der Versuche

Der Vergleich der mittels AR-Abnahmetool unterstützten TGA-Abnahme mit der konventionellen TGA-Abnahme erfolgte in einem realitätsnahen Umfeld. Zu diesem Zweck führten die Autoren Praxistests durch, um die Vor- und Nachteile beider Varianten herauszuarbeiten und zu vergleichen. Ein abgesperrter Bereich der Technikzentrale einer U-Bahn-Station in Wien diente als Versuchsort. In diesem Raum konnten gleichbleibende Versuchsbedingungen sichergestellt werden. Der Versuchsbereich konnte in ausreichender Lichtstärke [16] beleuchtet werden. Die vorhandene Raumhöhe hatte keinen negativen Einfluss auf die Genauigkeit der Messsensoren in der AR-Brille.

Bei der verwendeten AR-Brille handelt es sich um eine Microsoft HoloLens 2. Für die Benutzung der Applikation war eine stabile Internetverbindung notwendig, die via Hotspot eines Smartphones zur Verfügung gestellt wurde. Dieses Smartphone hatte im gesamten Raum einen Empfang von 4G+ (bestmöglicher Empfang). Während des Versuchs befand sich das Smartphone durchgehend im Umkreis von 3 m zur AR-Brille. Somit hatte die Internetanbindung keine limitierende Einwirkung auf die Tests.

Die Versuche erfolgten zu einer Zeit, in der Einschränkungen aufgrund der COVID-Pandemie in Österreich vorherrschten. Der für die Tests ideale Versuchsort schränkte aufgrund von Zugangsbeschränkungen die Auswahl der Testpersonen zusätzlich ein. Daher konnte nur eine limitierte Anzahl an Testpersonen an den Versuchen teilnehmen. Sieben Testpersonen mussten zuvor definierte Aufgabenstellungen ausführen. Die Testpersonen hatten ein für die Versuche in erforderlicher Qualität vorbereitetes BIM-Modell zur Verfügung.

4.2 Versuche

Für eine bessere Übersicht und aussagekräftigere Auswertung der Daten im Anschluss an die Versuche galt es, die alltäglichen Tätigkeiten der ÖBA in Aufgaben zu unterteilen. Somit konnten Teilaufgaben genauer gegenübergestellt und verglichen werden. Die gewählten Teilaufgaben sind:

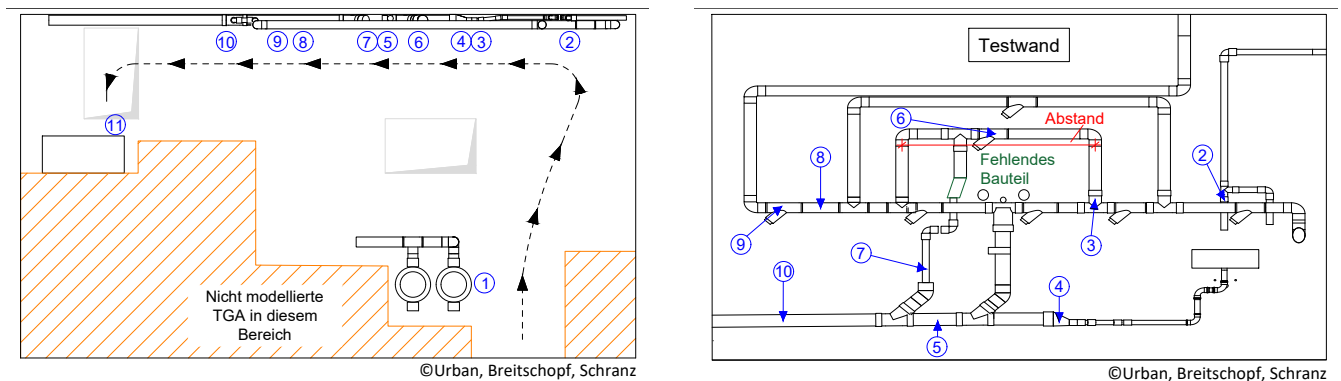


Bild 4. Verteilung der Mängel im Grundriss (links) und in der Ansicht der Testwand sowie Angabe des zu messenden Abstands und des fehlenden Bauteils (rechts) Grafik: Urban, Breitschopf, Schranz
Fig. 4. Distribution of defects in the floor plan (left) and in the view as well as the markings of the distance to measure and the missing component (right) Source: Urban, Breitschopf, Schranz

1. Kontrolle, ob Mängel behoben wurden
2. Abstandsmessungen
3. Fehlendes Bauteil dokumentieren
4. Mängelaufnahme und Verarbeitung der Daten

In der AR-unterstützten Variante legte die AR-Brille virtuell das BIM-Modell über den realen Bestand (**Bild 3**). Die BIM-Modelle werden zuvor als IFC-Dateien in das AR-Abnahmetool von ARIOT auf der AR-Brille geladen. Der Einsatz von AR-Brillen verlangt eine für viele neue Art der Steuerung (Fingertracking). Vor Beginn der Versuche erhielten die Testpersonen eine Einweisung in die Verwendung der AR-Brille und sie mussten unter Anleitung zwei Probemängel aufzeichnen.

4.2.1 Aufgabe 1: Kontrolle, ob Mängel behoben wurden

Bei der ersten Aufgabe erhielten die Teilnehmer eine vorhandene Mängelliste. Sie mussten die dort gelisteten Mängel auffinden sowie auf Behebung kontrollieren und dann den Status der Behebung protokollieren. Dabei wurde die Zeitdauer für diese Aufgabe gemessen. Bei der konventionellen Mängelabnahme war dies eine ausgedruckte Mängelliste, wie in der Praxis üblich. Die zur Verfügung gestellte Mängelliste beinhaltete neun Mängel, davon waren sieben behoben und zwei offen. Die beiden zu kontrollierenden Mängel waren in der Liste in Orange hervorgehoben. Informationen des Raums, zugehörige Bilder und relevante Daten für die Überprüfung waren ebenfalls in der Liste enthalten. In der AR-unterstützten Variante erhielten die Testpersonen keine ausgedruckte Mängelliste. Stattdessen befanden sich sämtliche Mängel innerhalb des 3D-BIM-Modells im AR-Abnahmetool. Die nicht behobenen Mängel waren im AR-Modell mit einer großen, roten Stecknadel hervorgehoben, welche die Informationen des jeweiligen Mangels enthielten. Bild 3 zeigt ein Beispiel für einen markierten Mangel in der Nutzeransicht der AR-Brille.

4.2.2 Aufgabe 2: Abstandsmessung

Auf der Baustelle wird die Abstandsmessung unterstützend für den Abgleich zwischen dem Bauwerk und den Plänen durchgeführt. Die ÖBA überprüft dabei den Abstand zwischen zwei Bauteilen, die lichte Höhe oder die Abmessungen eines bestimmten Elements. Daher bestand die nächste Aufgabe darin, den Abstand zwischen zwei Punkten zu messen. Der zu messende Abstand ist

in **Bild 4** rot dargestellt. Wieder wurde die Zeitdauer für diese Aufgabe aufgezeichnet. Bei der konventionellen Methode diente ein Maßband zur Abstandsmessung. Die AR-unterstützte TGA-Abnahme konnte auf die verbaute Funktion zurückgreifen, Abstände zu messen.

4.2.3 Aufgabe 3: Fehlendes Bauteil dokumentieren

Als dritte Aufgabe sollte ein fehlendes Bauteil der Verrohrungen gefunden und dokumentiert werden. Bei der konventionellen Methode erhielten die Testpersonen einen Plan in ausgedruckter Form. Dieser stand den Testpersonen der AR-unterstützten TGA-Abnahme nicht zur Verfügung. Diese sahen das Bauwerk mit dem virtuellen 3D-BIM-Modell überlagert, wie in Bild 3 dargestellt. Bei der AR-unterstützten Methode wird der Vergleich zwischen dem Modell vor Ort mit dem 3D-BIM-Modell durchgeführt. Dieser Abgleich zwischen dem Bauwerk und den Plänen kommt in der Praxis häufiger vor und ist bei komplexen Einbauten ein sehr langwieriger Prozess. Das fehlende Bauteil ist in Bild 4 in Grün hervorgehoben.

4.2.4 Aufgabe 4: Mängelaufnahme und Verarbeitung der Daten

Eine der Haupttätigkeiten der ÖBA ist die Mängelaufnahme. Diese Aufgabe wurde in zwei Subaufgaben unterteilt: Aufzeichnung der Mängel im Versuchsraum und Verarbeitung der Daten. Die Verarbeitung der Daten beinhaltet das Erstellen einer Mängelliste und einer Niederschrift sowie das Übertragen der Mängel in ein 3D-BIM-Modell. Die Mängel wurden vor Beginn des Versuchs auf der technischen Gebäudeausrüstung mittels laminierten Kärtchen markiert. Realistische Schadensbilder dienten als Vorlage für die markierten Mängel, die nicht versteckt, sondern direkt erkennbar waren. Die Mängel mussten der Reihe nach abgearbeitet werden, um eine bessere Vergleichbarkeit der Tests zu erhalten. Durch die Vorgabe der Reihenfolge der Mängel ergibt sich ein fixer Gehweg. Dieser ist in Bild 4 (links) als strichlierte Linie dargestellt. Systematisch arbeiteten sich die Versuchsteilnehmer bei der Mängelaufzeichnung von Mangel 1 bis Mangel 11 vor. Eine Auflistung der Mängelbezeichnungen ist in **Tabelle 2** zu finden. Die meisten Mängel wurden an einer Wand (Testwand) platziert. Bild 4 (rechts) zeigt die Ansicht dieser Testwand. Ne-

ben der Dauer für die Mängelaufnahme wurde auch die Dauer für die Nachbearbeitung der Mängel aufgezeichnet.

Die konventionelle Methode umfasste die Aufzeichnung der Mängel auf der Baustelle, das Abfotografieren der Mängel und das Erstellen einer Audiobeschreibung. In der Nachbearbeitung im Büro wurde zuerst eine projektbezogene Vorlage für die Mängelliste aufgesetzt und danach die Niederschrift verfasst. Abschließend erfolgte die Verortung der aufgenommenen Mängel im 3D-BIM-Modell.

Für die AR-unterstützte TGA-Abnahme musste zuerst eine standardisierte Mängelliste erstellt werden, anhand derer die Zuordnung der Mängel in IFC-Kategorien erfolgte. In Zukunft wird diese bürointern für alle Mängelkategorien [22] bereits existieren. Daher fällt diese Zeit dann bei der Mängelaufnahme weg. Die Mängelaufnahme selbst erforderte mehrere Schritte. Zuerst verorteten die Testpersonen den Mangel mit einer Markierung im 3D-BIM-Modell und nahmen ein Foto dieses Mangels auf. Dann beschrieben sie den Mangel in einer Audioaufnahme. Im nächsten Schritt ordneten die Testpersonen den Mangel der vorab erstellten Mängelkategorie zu und vollendeten den Prozess mit einer genaueren Mängelauswahl aus einer vorhandenen Liste.

4.3 Befragung der Testpersonen

Anhand einer Checkliste kontrollierte die Testleitung den Ablauf sowie die einheitliche Struktur der Versuche. Die Testpersonen waren angehalten, während der Versuche alles, was ihnen auffiel, laut auszusprechen. Am Ende der Versuche beantworteten die Testpersonen einige Frage zum Ablauf der Versuche. Dabei gaben die Testpersonen Antworten zu den Vor- und Nachteilen der jeweiligen Abnahmeart an. In einem Fragekatalog bewerteten die Testpersonen zudem, ob der Einsatz von AR die Effizienz und Bauqualität auf der Baustelle steigern könne und welche möglichen

Hemmschwellen es bei der Nutzung von AR auf Baustellen aus ihrer Sicht gäbe.

5 Ergebnisse und Diskussion

Ziele des AR-Abnahmetools sind die Effizienzsteigerung sowohl des ÖBA-Prozesses auf der Baustelle als auch der Folgeprozesse (Nachbearbeitung) und die Erhöhung der Bauqualität durch einfacheres und früheres Erkennen von Baumängeln. Die ersten beiden Ziele wurden über die Versuchsdauer der einzelnen Aufgaben getestet. Dazu erfolgte der Vergleich zwischen der konventionellen TGA-Abnahme und der AR-unterstützten TGA-Abnahme. Die Ergebnisse dazu finden sich in Abschnitt 5.1. Danach folgt die Auswertung der offenen Fragebögen zur Betrachtung der von den Testpersonen angemerkten Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten in Abschnitt 5.2. In dieser Befragung gaben die ÖBA-Experten auch ihre Meinung zur Beeinflussung der Bauqualität durch den Einsatz von AR ab.

5.1 Auswertung der Versuchsdauern

Während der Versuche wurden die Zeiten gemessen, die die Testpersonen für die Durchführung der Teilaufgaben benötigten. Ob die AR-unterstützte TGA-Abnahme zeitliche Vorteile gegenüber der konventionellen TGA-Abnahme aufweist, hängt stark von der Aufgabenstellung ab. Im Folgenden finden sich die Ergebnisse der einzelnen Aufgaben. **Tabelle 3** zeigt die durchschnittlichen Versuchszeiten für die ersten drei Aufgaben.

5.1.1 Aufgabe 1: Kontrolle, ob Mängel behoben wurden

Bei der ersten Aufgabe mussten die Testpersonen kontrollieren, ob Mängel schon behoben waren. Im Durchschnitt benötigten die Testpersonen je Mangel 1:11 min bei der konventionellen TGA-Abnahme (mit Plan und Protokoll) und 0:44 min bei der AR-unterstützten TGA-Abnahme (Tabelle 3). Damit sind die Testpersonen mit dem AR-Abnahmetool um 38 % schneller. Der Suchprozess geht aufgrund der besseren Sichtbarkeit durch die auffallenden Pins im 3D-Modell bei der AR-unterstützten Methode deutlich schneller vonstatten.

5.1.2 Aufgabe 2: Abstandsmessung

Bei der zweiten Aufgabe hatten die Testpersonen einen Abstand zwischen zwei Punkten zu messen. Mit der konventionellen Methode verstrichen durchschnittlich 5 s und bei der Verwendung der Messfunktion im AR-Abnahmetool 14 s (Tabelle 3). Aus den Zeiten geht klar hervor, dass die konventionelle Methode deutlich schneller ist.

5.1.3 Aufgabe 3: Fehlendes Bauteil dokumentieren

Bei der dritten Aufgabe mussten die Testpersonen ein fehlendes Bauteil finden und dokumentieren. Die Testpersonen benötigten im Durchschnitt 48 s bei der konventionellen TGA-Abnahme und 14 s unter Verwendung des AR-Abnahmetools (Tabelle 3). Somit konnte ein fehlendes Bauteil mit der AR-unterstützten Abnahme um circa 70 % schneller gefunden werden. Aufgrund der Überlagerung des BIM-Modells mit der Realität sind Fehler mit der AR-Brille visuell schneller zu erkennen.

Tabelle 2. Mängelliste für die Aufnahme der Mängel
Table 2. List of defects for the recording of the defects

Nr.	Mängelbeschreibung
1	Display defekt
2	Kollision mit einem anderen Bauteil
3	Dämmung beschädigt
4	Falsche Rohrdimension verwendet
5	Position falsch
6	Verbindung undicht
7	Dämmung fehlt
8	Beschriftung fehlt
9	Falsche Einbaurichtung
10	Befestigung der Leitung mangelhaft
11	Dämmung beschädigt

Tabelle 3. Durchschnittliche Dauer der einzelnen Versuche
Table 3. Average time for the tests

	Mängelbehebung	Abstandsmessung	Fehlende Bauteile
AR [min]	0:44	0:14	0:14
Konventionell [min]	1:11	0:05	0:48

5.1.4 Aufgabe 4: Mängelaufnahme und Verarbeitung der Daten

Die Mängelaufnahme ist eine der wesentlichen Aufgaben der ÖBA auf der Baustelle. Dazu gehört neben der Mängelaufzeichnung auf der Baustelle auch die Nachbearbeitung. Bei der AR-unterstützten Abnahme fallen bei der Mängelaufzeichnung mehrere Schritte direkt auf der Baustelle zusammen. Die Testpersonen lokalisieren den Mangel, markieren diesen mit einem Pin im 3D-BIM-Modell, klassifizieren und beschreiben diesen sodann. Für die Testpersonen waren diese Schritte noch relativ ungewohnt, da sie diese erst einmalig bei der Einweisung durchführten. Daher dauerte die Mängelaufnahmezeit der ersten Mängel länger als bei den folgenden Mängeln. **Bild 5** zeigt den Einarbeitungseffekt jener Testperson, bei der dieser Effekt am stärksten ausgeprägt war. Nach einigen Mängeln pendelte sich bei dieser Testperson die Aufnahmezeit auf 0:45 min bis 1:30 min ein. Da diese Testperson bei Mangel 1 und Mangel 4 Unterstützung bei der AR-Handhabung von der Testleitung benötigte, wurden diese Zeiten in **Bild 5** nicht berücksichtigt.

Die Mängelaufzeichnung verläuft bei der konventionellen Abnahme deutlich schneller, nämlich in circa 18 s pro Mangel. Zur Ermittlung der anschließenden Bearbeitungszeit der Daten im Büro wurden Interviews mit berufserfahrenen Experten des Projektpartners FCP geführt, deren Aufgabenbereich die Nachbearbeitung der aufgezeichneten Mängeldaten ist. Daraus wurde erhoben, dass die Nachbearbeitung für die elf Beispielmängel in Summe 60 min dauerte. Davon entfallen circa 30 min auf die Niederschrift und Sichtung der aufgezeichneten Daten und circa 15 min auf das Aufsetzen der Vorlage für die Mängelliste. Weitere 15 min fallen für die Eintragung der Mängel in das 3D-BIM-Modell an. Diese Daten führen zu einer durchschnittlichen Gesamtzeit je Mangel von 5:45 min, wie in **Bild 6** dargestellt.

Bei der AR-unterstützten Variante werden die Mängeldaten bei der Aufzeichnung von der AR-Brille auf einen Webserver geladen. Diese erlaubt den späteren Export der Daten in eine Excel-Datei mit nur zwei Klicks. Während der Versuche dauerte der Aufruf des Webserver sowie der Export 5:00 min. Die Eintragung der Mängel in das zugehörige 3D-BIM-Modell geschieht bei der AR-unterstützten TGA-Abnahme durch die Markierung der Mängel. Da während der AR-unterstützten Mängelaufzeichnung gleichzeitig die Mängelbeschreibung erfolgt, fallen die Schritte Mängelaufzeichnung, Niederschrift und 3D-BIM-Modell in **Bild 6** bei der AR-Variante zusammen. Daher dauerte dieser Schritt mit 57 s deutlich länger als bei der konventionellen Variante (18 s), jedoch fallen die Nachbearbeitungsschritte weg. Die Erstellung der Mängelkategorien sowie die Übertragung auf die AR-Brille dauerten insgesamt 5:00 min und somit durchschnittlich 27 s je Mangel. Dadurch ergibt sich eine durchschnittliche Gesamtzeit je Mangel von 1:24 min. Die Gesamtzeit der AR-unterstützten TGA-Abnahme ist somit deutlich (um 75 %) niedriger als jene der konventionellen Abnahme.

5.2 Vor- und Nachteile der AR-unterstützten Abnahme

Aus den Aufzeichnungen während der Versuche sowie den ausgefüllten Fragebögen konnten die von den Testpersonen angeführten Vor- und Nachteile der AR-Abnahme zusammengefasst werden. Die gemessenen Zeiten zeigen, dass bei einfachen Aufgaben (z. B. Messen) die konventionelle Abnahme schneller als die

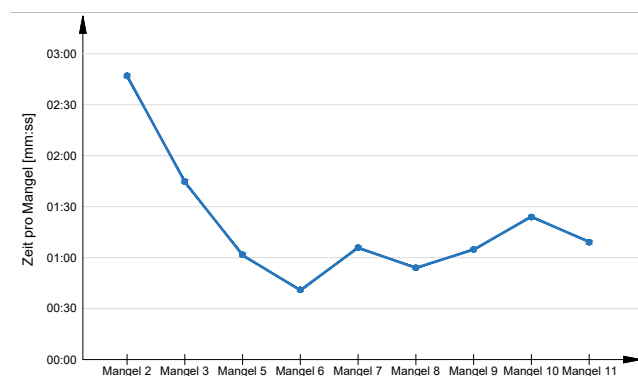


Bild 5. Einarbeitungseffekt: Dauer der Mängelaufnahme einer Testperson
 Grafik: Breitschopf
 Fig. 5. Familiarisation effect: duration of a test person's defect recording
 Source: Breitschopf

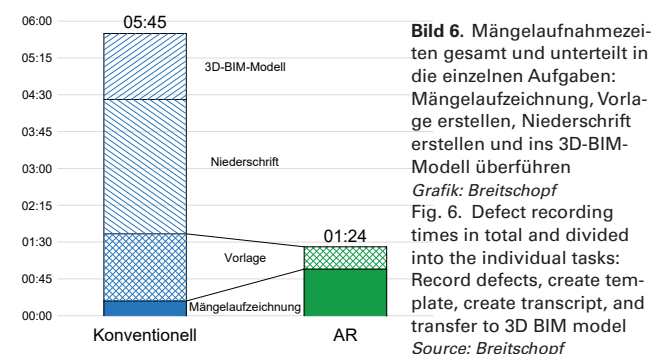


Bild 6. Mängelaufnahmezeiten gesamt und unterteilt in die einzelnen Aufgaben: Mängelaufzeichnung, Vorlage erstellen, Niederschrift erstellen und ins 3D-BIM-Modell überführen
 Grafik: Breitschopf
 Fig. 6. Defect recording times in total and divided into the individual tasks: Record defects, create template, create transcript, and transfer to 3D BIM model
 Source: Breitschopf

AR-unterstützte Abnahme ist. Bei komplizierteren Aufgaben bietet die visuelle Unterstützung des AR-Abnahmetools eine wesentliche Hilfe, weshalb die Testpersonen zum Teil deutlich schneller die jeweilige Aufgabe erledigen konnten. Gerade bei den beiden Hauptaufgaben – Mängelaufnahme (Aufgabe 4) und Kontrolle aufgezeichneter Mängel (Aufgabe 1) – ist die AR-unterstützte Abnahme viel schneller und effektiver. Diese AR-basierte Form der TGA-Abnahme erwies sich bei den Aufgaben als zeiteffizienter. Aufgrund der Überlagerung des 3D-BIM-Modells konnten Mängel schneller und genauer gefunden werden (60 % der Testpersonen merkten dies an). Dies gilt insbesondere aufgrund der Markierungen für bereits aufgezeichnete Mängel. Generell gefiel die wesentlich schnellere Mängelaufnahme aufgrund des automatisierten Ablaufs der Datenverwaltung und der wegfallenden Nachbearbeitungszeit. Die Erfassung der Mängel geht mit dem Erstellen der Mängelliste einher. Durch den Wegfall der Zwischenschritte sehen 80 % der Testpersonen eine Beseitigung von potenziellen Fehlerquellen. Die Mängelaufnahme bereits beim Verlassen der Baustelle abgeschlossen zu haben, wirkte sich positiv auf das persönliche Wohlbefinden aus.

Ein weiterer Vorteil ist die Einbindung in BIM. Der Vergleich des Geplanten mit dem Bauwerk und die Untersuchung auf Fehler ist mit der AR-Methode deutlich einfacher durchzuführen, da durch die Überlagerung des 3D-Modells Abweichungen schneller erkennbar sind. Darüber hinaus können kleine Abweichungen von wenigen Zentimetern schnell erfasst werden. Aufgrund der visuellen Überlagerung kann die Fehlersuche gleichzeitig mit anderen Tätigkeiten auf der Baustelle durchgeführt werden und ein

zusätzlicher Arbeitsschritt entfällt. Es wird kein zusätzliches Equipment gebraucht, da die verwendete AR-Brille (Microsoft HoloLens 2) und das Abnahmetool sehr universell einsetzbar sind. Die Testpersonen merkten an, dass die Arbeit mit der AR-Brille strukturierter ablief, da schrittweise vorzugehen war.

Der Frage, ob der Einsatz der AR-unterstützten Abnahme die Bauqualität steigere, stimmten 80% der Testpersonen zu. 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 fundierter und schneller getroffen werden. Vorhandene Mängel werden aufgrund des visuellen Vergleichs zwischen geplanten und gebauten Zustand leichter und schneller erkannt.

Für die Abstandsmessung erweist sich das AR-Abnahmetool nur dann als vorteilhaft, wenn dies bei schwer zugänglichen Bereichen oder längeren Strecken eingesetzt wird, bei denen sonst eine weitere Person erforderlich ist. Bei kurzen Strecken ist die konventionelle Methode wesentlich rascher.

Die Testpersonen führten auch einige Probleme der AR-Brille während der Versuche an. Obwohl die visuelle Überlagerung des 3D-Modells generell gelobt wurde, überdeckte diese in manchen Situationen einzelne Mängel am Bauwerk. Diese waren schwieriger erkennbar. Ein zusätzlicher Nachteil ist, dass eine flächendeckende, stabile Internetverbindung auf der Baustelle erforderlich ist, um die Applikation und die automatisierte Datenverwaltung zu nutzen. Diese Abdeckung kann in abgeschiedenen Orten schwierig sein, zum Beispiel Kellergeschossen. In hellen Bereichen haben AR-Brillen vereinzelt Probleme mit der Steuerung; Befehle des Nutzers werden dann nicht mehr wahrgenommen. Daten-intensive oder schnelle Eingaben konnten die HoloLens 2 (im derzeitigen Entwicklungsstand) überlasten und zu Verzögerungen oder im ungünstigen Fall sogar zum Absturz des Systems führen. Eine nicht exakte Überlagerung des 3D-Modells mit dem Bauwerk störte in wenigen Fällen. Vereinzelt trat auch eine Systemträgheit beim Bewegen der Brille auf, bei der das 3D-Modell in der Bewegung nachhinkte. Als nachteilig wird in einigen Fällen die Umgewöhnungsphase auf das AR-System angemerkt.

6 Fazit

Die mit Augmented Reality mögliche Visualisierung des BIM-Modells und der Zugriff auf dessen Informationen direkt auf der Baustelle ergeben viele mögliche Anwendungsfälle. Einige davon können die Effizienz des Personals auf der Baustelle verbessern, zum Beispiel die AR-unterstützte Abnahme der ÖBA. Daher untersuchten die Autoren am Beispiel der technischen Gebäudeausrüstung die mögliche Effizienzsteigerung durch Verwendung eines gemeinsam mit Forschungspartnern entwickelten AR-Abnahmetools für eine AR-Brille (Microsoft HoloLens 2) sowie dessen Benutzerfreundlichkeit im Baustellenumfeld.

Die Versuche der Autoren zeigten, dass bei bestimmten Aufgaben (z. B. Messen) keine Beschleunigung mit dem AR-Abnahmetool zu erzielen war. Wesentliche Effizienzsteigerungen konnten bei komplizierten Aufgaben oder Aufgaben, die mehrere Tools benötigten, erreicht werden. Dies zeigte sich besonders bei den Hauptaufgaben der ÖBA – Mängelaufnahme und Mängelkontrolle. Mehrere Faktoren sind dafür verantwortlich: die visuelle Unterstützung durch das virtuelle 3D-Modell (samt Markierungen), das Vorhandensein mehrerer Tools und die direkte Verknüpfung

mit dem BIM-Modell. Die Testpersonen hoben neben diesen Faktoren die Vielseitigkeit der AR-Brille und die mögliche Erhöhung der Bauqualität durch genauere Informationen hervor. Nachteilig wurden die Abhängigkeit von stabilem, auf der Baustelle flächendeckendem Internetzugang und in manchen Situationen die zu geringe Prozessorleistung der AR-Brille angegeben.

Die durchgeführten Aufgaben decken nicht das gesamte Tätigkeitsfeld der ÖBA und der Ort der Versuchsdurchführung wurde für die AR-unterstützte TGA-Abnahme spezifisch ausgewählt, um den Einsatz von AR aufgrund der derzeitigen Hard- und Softwarelimitierung zu ermöglichen. Es muss ein BIM-Modell vorhanden sein. Erst dann bietet der Einsatz von AR Vorteile. Die Genauigkeit der Sensoren lässt bei größer werdenden Abständen nach. Ebenso haben die vorhandenen Lichtverhältnisse einen Einfluss auf die Genauigkeit der AR-Brillen (z. B. direkte Sonneneinstrahlung einen negativen Einfluss). Eine stabile Internetverbindung ist für die Übertragung der Mängel in das BIM-Modell auf einem Server erforderlich. Dies kann derzeit nicht auf jeder Baustelle gewährleistet werden. Der gewählte Versuchsort hatte diese Probleme nicht. Mit diesen Versuchen sollte gezeigt werden, was derzeit unter optimalen Verhältnissen möglich wäre. Diese Validierung dient daher als Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem Themenbereich.

Die durchgeführten Tests zeigen jedoch das Potenzial von Augmented Reality. In einigen Fällen bietet die AR-unterstützte Abnahme bereits jetzt einen effizienteren Ablauf als die konventionelle Variante. Um aber eine allgemeine Kosten-Nutzen-Aussage zu treffen, müssen mehr AR-Applikation und dadurch mehr Anwendungsfälle am Markt existieren und diese evaluiert werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich. Durch die AR-unterstützte Abnahme ist ein lückenloser Übergang von der Planung in die Ausführung geschaffen. Dies hätte auch zur Folge, dass alle Daten digital zur Verfügung stehen und es keinen Bruch zwischen analogen und digitalen Medien gibt. Der in diesem Artikel gezeigte Anwendungsfall könnte in einigen Jahren zum Standard für die ÖBA auf der Baustelle werden.

DANKSAGUNG

Das Projekt AR-AQ-Bau wurde über die FFG-Förderschiene *Stadt der Zukunft* gefördert, ein Forschungs- und Technologieprogramm des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie. Die Autoren bedanken sich für die Förderung.

Literatur

- [1] Haghsheno, S.; Deubel, M.; Spenner, L.: Digitale Technologien und deren Wertschöpfungspotenziale für die Bauwirtschaft. In: *Bauingenieur* 95 (2019), Heft 2, S. 45-55. doi.org/10.37544/0005-6650-2019-02-31.
- [2] Klinec, R.; Turk, Ž.: Construction 4.0 – digital transformation of one of the oldest industries. In: *Economic and Business Review*, Vol. 21 (2019), Iss. 3, pp. 393-410. doi.org/10.15458/ebv.92
- [3] Sawhney, A.; Riley, M.; Irizarry, J. (Hrsg.): *Construction 4.0 – an innovation platform for the built environment*. Routledge, London, 2020.
- [4] Rübmann, M.; Lorenz, M.; Gerbert, P. et al.: Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing industries. In: *Boston Consulting Group*, Vol. 9 (2015), pp. 54-89.

- [5] *Changali, S.; Mohammad, M.; van Nieuwland, M.*: The construction productivity imperative. McKinsey & Company, 2015, www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-inspections/the-construction-productivity-imperative [Zugriff am: 15.04.2020].
- [6] *Sanchez, A.; Hampson, K.; Vaux, S.*: Delivering Value with BIM: A Whole-of-Life Approach. Routledge, London, 2016.
- [7] *Urban, H.; Schranz, C.; Gerger, A.*: BIM auf Baustellen mit Augmented Reality. In: *Bauaktuell* 10 (2019), Heft 5, S. 192-196. doi.org/10.34726/1241.
- [8] *Wang, X.; Truijens, M.; Hou, L. et al.*: Integrating Augmented Reality with Building Information Modeling: Onsite construction process controlling for liquefied natural gas industry. In: *Automation in Construction*, Vol. 40 (2014), pp. 96-105. doi.org/10.1016/j.autcon.2013.12.003.
- [9] *Milgram, P.; Kishino, F.*: A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. In: *IEICE Trans. Information Systems*, Vol. E77-D (1994), Iss. 12, pp. 1321-1329.
- [10] *Niedermair, S.*: Augmented Reality on Mobile Devices for Architectural Visualization. TU Wien, Diplomarbeit, 2012. hdl.handle.net/20.500.12708/13692.
- [11] *Meza, S.; Turk, Z.; Dolenc, M.*: Measuring the potential of augmented reality in civil engineering. In: *Advances in Engineering Software*, Vol. 90 (2015), pp. 1-10. doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.06.005.
- [12] *Kumeran, G.; Santhi, K.; Anand, P. M.*: Impact of Augmented Reality (AR) in Civil Engineering. In: *Advanced Materials Research*, Vol. 18-19 (2007), pp. 63-68. doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.18-19.63.
- [13] *Wang, X.; Kim, M. J.; Love, P. E. et al.*: Augmented Reality in built environment: Classification and implications for future research. In: *Automation in construction*, Vol. 32 (2013), pp. 1-13. doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.021.
- [14] *Urban, H.; Schranz, Ch.*: AR-AQ-Bau – Einsatz von Augmented Reality zur Abnahme und Qualitätssicherung auf Baustellen. 2018, www.nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/ar-aq-bau.php [Zugriff am: 01.06.2021].
- [15] *Schranz, Ch.; Gerger, A.; Urban, H.*: Augmented Reality im Bauwesen: Teil 1 – Anwendungs- und Anforderungsanalyse. In: *Bauingenieur* 95 (2020), Heft 10, S. 379-388. doi.org/10.37544/0005-6650-2020-10-49.
- [16] *Urban, H.; Irschik, T.; Schranz, Ch. et al.*: Augmented Reality im Bauwesen: Teil 2 – Baustellentaugliches Trackingsystem. In: *Bauingenieur* 95 (2020), Heft 12, S. 501-508. doi.org/10.37544/0005-6650-2020-12-67.
- [17] *Teizer, J.; Wolf, M.; König, M.*: Mixed Reality Anwendungen und ihr Einsatz in der Aus- und Weiterbildung kapitalintensiver Industrien. In: *VDI-Bautechnik Jahresausgabe 2017/18* (2018), S. 73-82.
- [18] *Shin, D. H.; Dunston, P. S.*: Technology development needs for advancing Augmented Reality-based inspection. In: *Automation in Construction*, Vol. 19 (2010), pp. 169-182. doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.001.
- [19] *Park, C.-S.; Lee, D.-Y.; Kwon, O.-S. et al.*: A framework for proactive construction defect management using BIM, augmented reality and ontology-based data collection template. In: *Automation in Construction*, Vol. 33 (2013), pp. 61-71. doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.010.
- [20] *Olson, D.; Kim, J.; Taylor, J. M.*: Using augmented reality for masonry and concrete embed coordination. In: *Skibniewski, M. J.; Hajdu, M. (eds.)*: Proceedings of the Creative Construction Conference 2019, Budapest, Hungary, pp. 906-913. doi.org/10.3311/CCC2019-125.
- [21] *Abbas, A.; Seo, J.; Kim, M.*: Impact of Mobile Augmented Reality System on Cognitive Behavior and Performance during Rebar Inspection Tasks. In: *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 34 (2020), Iss. 6, pp. 112-121. doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000931.
- [22] *Haponiuk, B.*: Entwicklung eines Augmented Reality Interfaces für TGA-Abnahme. TU Wien, Diplomarbeit, 2020. doi.org/10.34726/hss.2020.65506.
- [23] *Urban, H.*: Digitale Transformation von Bauprozessen anhand von Augmented Reality und openBIM. TU Wien, Dissertation, 2022. hdl.handle.net/20.500.12708/79667.
- [24] *El Jazzar, M.; Urban, H.; Schranz, Ch. et al.*: Construction 4.0: A Roadmap to Shaping the Future of Construction. In: *Osumi, H.; Furuya, H.; Tateyama, K. (eds.)*: Proceedings of 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020), pp. 1314-1321. doi.org/10.22260/ISARC2020/0180.
- [25] *Marino, E.; Barbieri, L.; Colacino, B. et al.*: An augmented reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments. In: *Computers in Industry*, Vol. 127 (2021), 103412. doi.org/10.1016/j.compin.2021.103412.



**Dipl.-Ing. Dr.techn.
Harald Urban, BSc**

harald.urban@tuwien.ac.at

Foto: Roland Rainer

Norbert Breitschopf

norbert.breitschopf@tuwien.ac.at

**Associate Prof. Dipl.-Ing.
Dr.techn. Christian Schranz,
M.Sc.**

christian.schranz@tuwien.ac.at

Technische Universität Wien
Forschungsbereich Digitaler Bauprozess
Karlsplatz 13/235-03, 1040 Wien, Österreich