

Augmented Reality im Bauwesen: Teil 1 – Anwendungs- und Anforderungsanalyse

Ch. Schranz, A. Gerger, H. Urban

ZUSAMMENFASSUNG Die Bauwirtschaft gehört bis dato zu den am wenigsten von der Digitalisierung erfassten Wirtschaftszweigen. Der vermehrte Einsatz von Building Information Modeling (BIM) in Planungsbüros beschleunigt nun die Digitalisierung des Bauwesens. Dies ermöglicht den vermehrten Einsatz weiterer digitaler Tools im Bauprozess, zum Beispiel Augmented Reality (AR). Neue Tools bieten die Chance, die vorhandenen Prozesse neu zu überdenken und auf Innovations- und Effizienzpotenzial zu untersuchen.

Die Autoren sehen für die Technologie AR großes Potenzial im Bauprozess. Im Forschungsprojekt AR-AQ-Bau führten sie daher eine Anwendungs- und Anforderungsanalyse für AR durch. In diesem Artikel werden einige derzeitige und mögliche Anwendungen von AR im Bauwesen sowie deren Anforderungen an AR-Hard- und Software (z. B. durch die Besonderheiten der Baustelle) dargestellt und ein Ausblick in die Zukunft gegeben. Der Anwendungsbereich von AR ist äußerst vielfältig. Einerseits kann BIM dadurch leichter auf die Baustelle übertragen und können Abnahmen und Qualitätskontrollen durchgeführt werden. Andererseits stellen ein Remote-Expert-System, Schulungen und die Unterstützung im Behördenverfahren weitere Einsatzmöglichkeiten dar.

STICHWÖRTER

Forschung und Entwicklung, Bauinformatik, Digitale Methoden

1 Einleitung zum Projekt AR-AQ-Bau

Die Digitalisierung der Baubranche schreitet immer stärker voran und führt im Bauwesen zum Teil zu radikalen Änderungen. Als einer der Hauptträger dieser Digitalisierung fungiert der vermehrte Einsatz von Building Information Modeling (BIM). Im Zuge dessen werden immer mehr digitale Tools entwickelt, die auf die Daten des BIM-Modells zurückgreifen und damit den Nutzen von BIM über den reinen Planungsprozess stark erweitern. Augmented Reality (AR) ist eine äußerst vielversprechende Technologie, um BIM verstärkt auf die Baustelle zu bringen. Ihre möglichen Einsatzgebiete gehen jedoch weit darüber hinaus (Teizer et al. [1]).

Im Forschungsprojekt AR-AQ-Bau (Einsatz von Augmented Reality zur Abnahme und Qualitätssicherung auf Baustellen) beschäftigt sich ein interdisziplinäres Forschungskonsortium unter der Führung des Zentrums Digitaler Bauprozess der TU Wien mit der Weiterentwicklung von AR für den Einsatz auf Baustellen. Partner im Konsortium sind das Ingenieurbüro FCP, der Forschungsbereich für Computer Graphics (TU Wien), das Start-Up ARIOT und (im ersten Jahr des Projekts) der AR-Brillenherstel-

Augmented Reality in civil engineering: Part 1 – Use-case and requirement analysis

ABSTRACT To date, the construction industry is one of the sectors of economy least affected by digitization. The increased use of Building Information Modeling (BIM) in design firms is now accelerating the digitization of the construction industry. This enables the increased use of other digital tools in the construction process, e.g. Augmented Reality (AR). New tools offer the opportunity to rethink existing processes and to examine them for innovation and efficiency potential.

The authors see great potential in the construction process for AR technology. In the research project AR-AQ-Bau, they, therefore, carried out an application and requirement analysis for AR. In this article, some current and possible applications of AR in the construction industry as well as their requirements for AR hard- and software (e.g. due to special conditions on construction sites) are presented. Additionally, an outlook into the future is given. The application area of AR is extremely diverse. On the one hand, BIM can be transferred to the construction site, and acceptance and quality controls can be carried out. On the other hand, a remote expert system, trainings and support in the building authorities procedure are additional applications.

ler DAQRI. Ziele des Forschungsprojekts sind die Anwendungsanalyse von AR sowie die sich aus deren Einsatz (vor allem auf Baustellen) ergebenden Anforderungen, die Verbesserung eines baustellentauglichen Trackingsystems, die Entwicklung eines bidirektionalen Datenaustauschs und eines User-Interfaces für die TGA-Abnahme sowie eines Remote-Expert-Systems. Im ersten Teil des Artikels gehen die Autoren auf die Anwendungs- und Anforderungsanalyse ein. Der zweite Teil beschäftigt sich mit dem Trackingsystem.

2 Augmented Reality – zwischen realer und virtueller Umgebung

Augmented Reality (AR) fällt in den Bereich der erweiterten Realitäten (Extended Realities). Die verschiedenen Stufen der Extended Reality zeigt **Bild 1** auf Basis des sogenannten Realitäts-Virtualitäts-Kontinuums von Milgram und Kishino [2]. Diese Stufen sind Augmented Reality, Augmented Virtuality und Virtual Environment/Reality. Augmented Reality weist laut Azuma [3] drei Charakteristika auf: Kombination von realer und virtueller Umwelt, Interaktion in Echtzeit und Registrierung in drei Di-

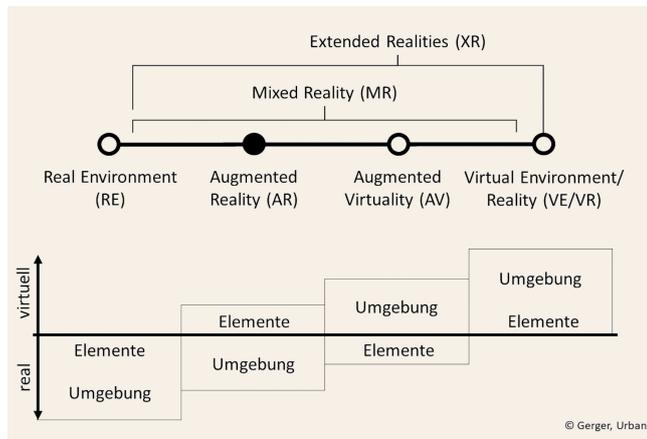


Bild 1. Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum (aus [4]) Abb.: Gerger, Urban
 Fig. 1. Reality virtuality continuum (from [4]) Source: Gerger, Urban

mensionen. Die reale Umgebung wird mit zusätzlichen virtuellen Informationen erweitert (z. B. Bilder, 3D-Modelle). Bei der Augmented Reality erweitern reale Objekte die virtuelle Umgebung und bei der Virtual Environment/Reality befindet man sich komplett in einer virtuellen Umgebung samt virtueller Elemente.

Für den Einsatz auf Baustellen kommt somit nur AR in Frage, da die reale Baustelle mit virtuellen Elementen (z. B. technische Gebäudeausrüstung) erweitert wird.

3 Anwendungen im Bauwesen

Im Zuge des Forschungsprojekts AR-AQ-Bau beschäftigen sich die Autoren mit der Analyse der Potenziale von AR im Bauwesen und führten Interviews mit einer breiten Palette an Stakeholdern [5]. Die Möglichkeit visueller Informationsaufbereitung geometrischer und semantischer Daten verortet in der realen Umgebung bietet das Potenzial, Bauprozesse über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks nicht nur zu beeinflussen, sondern auch grundlegend neu zu gestalten. Im Folgenden geben die Autoren einen Überblick über einige aktuelle und mögliche künftige Anwendungsfälle von Augmented Reality (AR) im Bauwesen.

3.1 Status quo

Eine Vielzahl der Firmen am österreichischen Bausektor entwickeln und testen aktuell Einsatzmöglichkeiten von AR [5]. Die meisten nutzen die Möglichkeit der Modellüberlagerung mittels AR. Überlagert wird dabei die reale Umgebung mit geometrischen und/oder semantischen Informationsmodellen. Die Autoren zeigen anhand einiger Beispiele derzeit schon genutzte Potenziale der AR-Technologie. Die Autoren listen in [5] bereits existierende Anwendungen zur Produktvisualisierung und zur Platzbedarfsprüfung im Bereich des Planens auf. Im Bereich des Bauens führen sie neun Anwendungsfälle zur Modellüberlagerung, Baudokumentation, zum mobilen Messen und zur Unterstützung von Schalungstätigkeiten an. Die Autoren zeigen anhand einiger dieser Beispiele schon genutzte Potenziale der AR-Technologie.

3.1.1 Einsatz AR in der Bauausführung

In einem Betriebsgebäude soll mit dem ersten Betonierschnitt begonnen werden. Damit es in weiterer Folge nicht zu Konflikten mit der Leitungsführung der Gebäudetechnik kommt, müssen einige Durchbrüche vorgesehen und diese in den Schalungsarbeiten berücksichtigt werden. Die entsprechende Kollisionsprüfung des Architekturmodells mit dem TGA-Modell wurde bereits in der Planungsphase am Computer durchgeführt. Nun geht es um die praktische Umsetzung in der Bauausführung. AR bietet dem Schalungstechniker aktuell zwei Möglichkeiten für Smartphone oder Tablet: die maßstäbliche Darstellung des herzustellenden Bauteils inklusive Schalungssystem verortet über dem Plan und die Darstellung des herzustellenden Bauteils inklusive Schalung unverortet/markerless in der realen Umgebung in variabler Größe. Beide Varianten haben die Vermeidung von Fehlern im Schalsystem aufgrund von Verständnisproblemen des Schalplanes als Ziel. Die Firma Doka bietet diese Funktionen für ausgewählte Beispielmuster öffentlich zugänglich an und entwickelt sie auf Pilotbaustellen weiter [6].

Vor dem Einbringen des Betons ist die geplante Bewehrung zu verlegen. Mithilfe der Schöck S-Construct App [7] lassen sich Baustellenanpassungen durch Einblenden zulässiger statischer Toleranzbereiche überprüfen und mittels Screenshots am Mobilgerät leicht dokumentieren.

Nach dem Ausschalen der Bauteile kann mit der Leitungsführung der Gebäudetechnik begonnen werden. Mithilfe von Smartphone oder Tablet wird das TGA-Modell aus der zentralen BIM-Plattform geladen und mit der realen Umgebung überlagert. Durch die Verortung des Modells wird die Leitungsführung aktuell mit einer Genauigkeit von ± 5 cm zur Soll-Position im Nahbereich eingeblendet. Dies hilft einerseits bei der visuellen Feststellung, ob Durchbrüche tatsächlich an der richtigen Position und in der erforderlichen Dimension ausgeführt wurden, und andererseits zum besseren Verständnis komplexer Leitungsführungen für die TGA-Techniker.

3.1.2 Einsatz von AR für die Baudokumentation

Die bisher genannten Anwendungen stützen sich vor allem auf die Überlagerung mit geometrischen Modellen. Ein Anwendungsfall für die Kombination von geometrischen und semantischen Informationen stellt die Baudokumentation dar. Nach Fertigstellung der TGA-Installationen unterstützt AR bei der Abnahme. Zwei Beispiele von AR-Interfaces zur Bauteilabnahme sind in **Bild 2** dargestellt. Links ist ein Mock-up zur TGA-Abnahme [8] für HMD-Geräte (Head Mounted Displays) dargestellt und rechts eine App der Firma Gamma AR für Mobilgeräte [9]. Erst wird durch einen Klick das Bauteil ausgewählt, um eine eindeutige Informationszuordnung zu ermöglichen. Anschließend können Informationen aus der IFC-Struktur des BIM-Modells abgerufen, Anmerkungen in schriftlicher, auditiver oder visueller Form festgehalten oder Bauteile freigegeben werden.

Der Datenfluss findet aktuell in vielen Anwendungen nur in eine Richtung vom BIM-Modell zur AR-App statt. Für eine effiziente Anwendung auf der Baustelle ist jedoch eine Rückführung von Informationen mittels BCF-Format in die BIM-Plattform sinnvoll. AR zur Modellüberlagerung und Bauteilfreigabe wird derzeit unter anderem von der Baufirma Porr in Zusammenarbeit

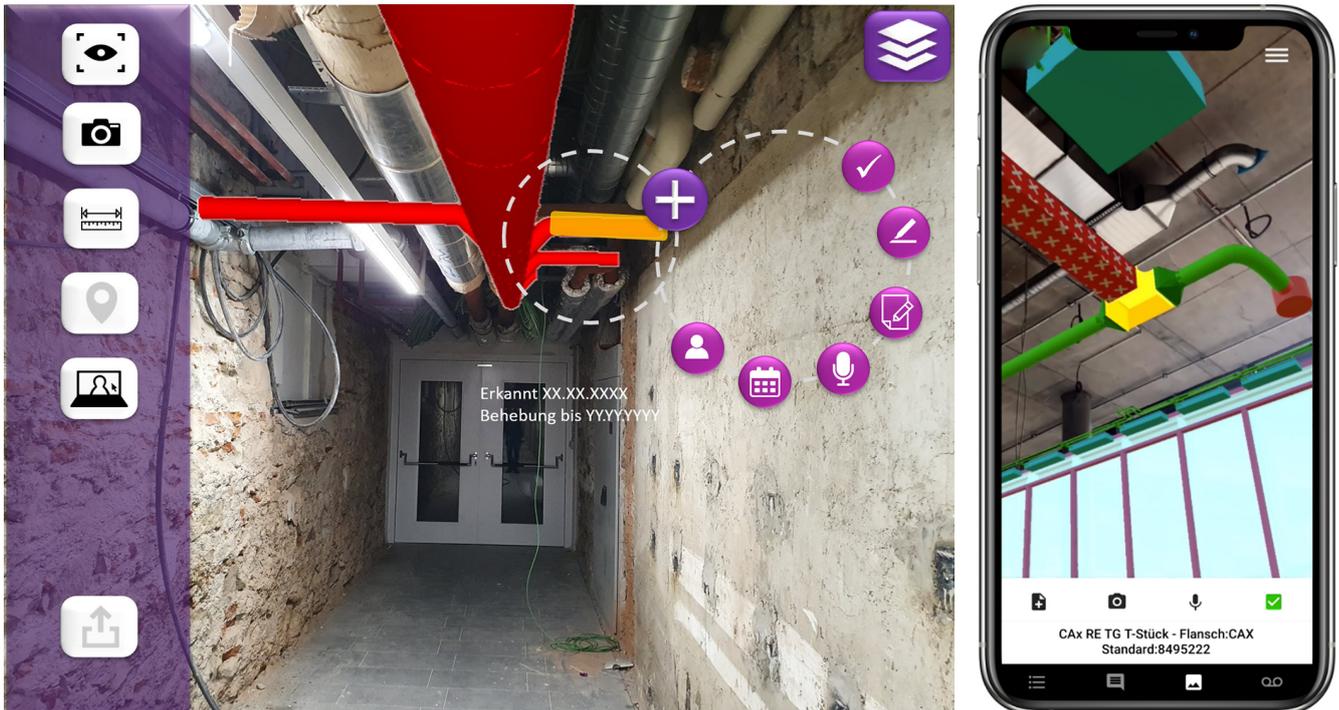


Bild 2. AR-Dashboard zur TGA-Abnahme [8] (links) und TGA-Ansicht in Gamma AR [9] (rechts) *Abb.: Urban, Bogna (links), Gamma AR (rechts)*
Fig. 2. AR dashboard for HVAC inspection [8] (left) and view of HVAC in Gamma AR [9] (right) *Source: Urban, Bogna (left), Gamma AR (right)*

mit Gamma AR und der Baufirma Strabag mit einer Eigenentwicklung getestet. In Gesprächen mit Testern auf Pilotbaustellen wurde folgende Herausforderung im Bereich der Bauteilfreigabe identifiziert: Laut ÖNORM A 6241-2 [10] sind beispielsweise Außenwände als mehrschichtige Bauelemente (z. B. Betonkern, WDVS, Innen- und Außenputz) auszuführen. Bei der Modellierung mehrschichtiger Bauelemente und bei der Einpflege in das AR-Modell ist besonders auf die richtige Einpflege von Informationen in die IFC-Struktur zu achten, um eine unabhängige Freigabe der einzelnen Komponenten im AR-Tool zu ermöglichen.

3.2 Mittel- bis langfristige Einsatzmöglichkeiten von AR

Die Autoren sehen die Anwendungsmöglichkeiten von AR jedoch nicht nur auf die Phase der Bauausführung beschränkt, sondern über den gesamten Bauwerkslebenszyklus. Im Projekt AR-AQ-Bau identifizierten die Autoren zusätzlich zu den bereits realisierten Anwendungsfällen eine weitere Anzahl zukünftiger Anwendungsfälle: Im Bereich Planen fünf, im Bereich Bauen 23, im Bereich Betreiben fünf und im Bereich der Schulungen vier Anwendungsfälle. Die meisten davon sind bereits im Entwicklungsstadium. Einige sollen hier nun beispielhaft genannt werden.

3.2.1 Besprechung mit AR-Unterstützung

Künftig können alle Personen bei Besprechungen durch die Verwendung von AR-Brillen dasselbe virtuelle AR-Modell sehen (ähnlich der Vorstellung der Holografie). Dabei können sowohl in der Planungsphase visuelle Kontrollen von Architekturmodellen, Tragwerksmodellen etc. als auch Überlagerungen von Planungsmodellen und Scan-Modellen während der Bauausführung durchgeführt werden. Als Pionier auf diesem Gebiet prüft das Ingenieurbüro FCP bereits in Pilotprojekten die Kontrolle und Be-

sprechung der Bewehrungsführung bei komplizierten Bauteilen mithilfe von AR. Der Vorteil der Ortsunabhängigkeit bei Besprechungen ist aufgrund der noch laufenden Entwicklung eines Remote-Expert-Systems erst in mittlerer Zukunft zu erwarten.

3.2.2 Behördenverfahren mit AR-Unterstützung

Anwendungsmöglichkeiten eröffnen sich auch bei Behörden. AR-Systeme können im Baugenehmigungsverfahren die Baupolizei, Parteien, Beteiligte sowie Bürger im Allgemeinen durch die Visualisierung wichtiger Informationen unterstützen. Dabei sind Anwendungsfälle sowohl im Büro als auch vor Ort denkbar. Den Mitarbeitern der Baubehörde werden Überprüfungen auf der Baustelle durch die Überlagerung des Bauzustandes mit relevanten Informationen des BIM-Modells (Einreichmodell, Tragwerksmodell etc.) erleichtert. Bürger sehen bereits vorab Wechselwirkungen entstehender Projekte, können effizienter miteinbezogen werden und einen Beitrag zur Gestaltung der Stadt leisten [11]. Entsprechend dem Masterplan Partizipation der Stadt Wien [12] könnte AR beispielsweise im Rahmen von Informationsausstellungen oder bei Workshops einen wichtigen Input durch Visualisierung geben.

3.2.3 Baugrubenaushub sowie Leitungsführung

Ebenfalls denkbar sind AR-Systeme für den Baugrubenaushub. In einem ersten Schritt soll der Umriss der auszuhebenden Kubatur in der Realität verortet eingeblendet werden. Dadurch würde die Anzahl der physisch notwendigen Punkte zur Orientierung reduziert werden – QR-Code, GPS oder Referenzflächen zur Verortung anstelle eines Schnurgerüsts. In einer weiteren Ausbaustufe kann durch eine Kombination mit Informationen zu Leitungsführungen unterhalb der Geländeoberfläche ein weiterer

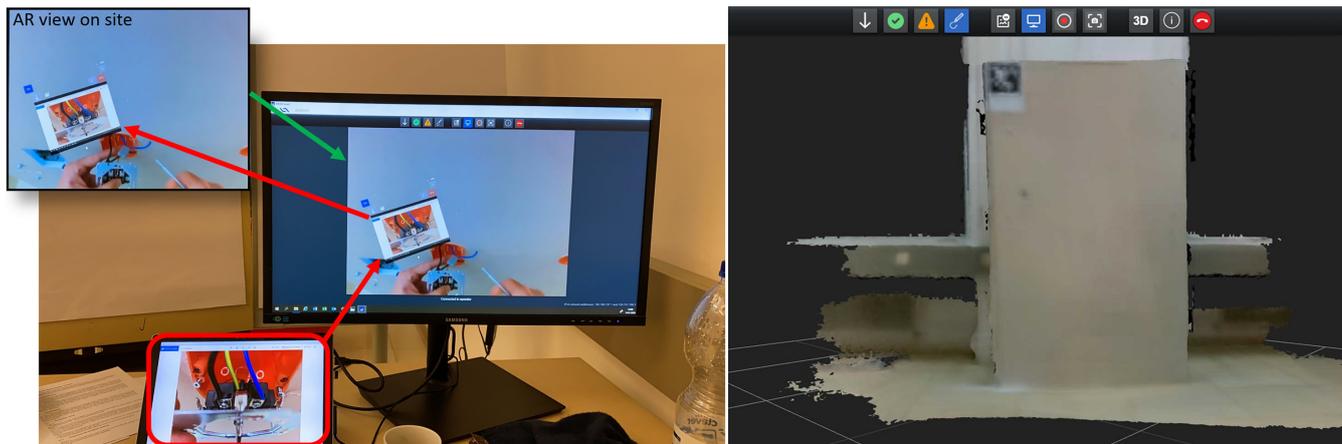


Bild 3. Remote-Expert-System zur Unterstützung vor Ort: Ansicht des Remote-Experten und HMD-Nutzers (links) und Ansicht Remote-Expert-Scan (rechts)
 Abb.: Schranz, Gerger, Urban
 Fig. 3. Remote expert system for on-site support: View of the remote expert and HMD-user (left) and view remote expert scan (right)
 Source: Schranz, Gerger, Urban

Mehrwert geschaffen werden. Gegenstände werden bereits für die Maschinenführer sichtbar, bevor sie freigelegt werden. Dadurch können Beschädigungen an Bestandsleitungen vermieden und die Sicherheit gesteigert werden. Für den öffentlichen Straßenraum kann auf den Informationen über unterirdische Leitungen und Einbauten, die bereits im Zentralen Digitalen Leitungskataster (ZLK) erfasst sind, aufgebaut werden. Im privaten Raum könnte durch die Aufnahme der tatsächlichen Leitungsführungen (Kanal, Elektro etc.) in As-built-Modelle und einer Speicherung dieser Informationen für künftige Projekte ebenfalls eine Datenbasis geschaffen werden. Giannopoulos arbeitet an Visualisierungsmöglichkeiten für unterirdische Infrastrukturen durch AR [13].

3.2.4 Schalungsarbeiten

Im Bereich der Beton- und Stahlbetonarbeiten arbeitet die Firma Doka an Systemen zum digitalen Aufreißen und zur Schalungsabnahme [14]. Dabei soll der Vorgang mit Schnurgerüst und Schlagschnur durch das Einblenden virtueller Grundrisslinien über die AR-Brille ersetzt, die Arbeitszeit verkürzt und der Vermessungsaufwand gesenkt werden. Die Schalungsabnahme kann durch eine KI-unterstützte Software erleichtert werden. Über die Kamera von Smartphone/Tablet oder AR-Brille wird ein Live-Bild der Schalung aufgenommen und mittels KI auf Fehler überprüft. Mithilfe von AR werden richtige Montagepunkte grün und Fehler in roter Farbe im Live-Bild hervorgehoben.

3.2.5 Remote-Expert-System

Ein besonders hohes Potenzial sieht das Forschungsteam des Projekts AR-AQ-Bau in einem Remote-Expert-System. Treten in der Bauausführung gewerkeübergreifende Problemstellungen auf, führen diese oftmals zu mühsamen Koordinationsarbeiten. Es gilt, möglichst rasch einen Termin mit den Experten auf der Baustelle zu organisieren – falls aber nicht möglich, dann per Bilddokumentation und Skizzen über Whatsapp oder E-Mail das Problem zu lösen. Das im Forschungsprojekt AR-AQ-Bau entwickelte Remote-Expert-System für AR-Brillen kann diesen Prozess durch Videotelefonie in Verbindung mit einem Tracking-System und der Möglichkeit, Markierungen im Live-Bild einzublenden, sehr

vereinfachen. In **Bild 3** ist die Kommunikation mit einem Remote-Experten dargestellt. Dieses System realisiert die bereits erwähnte Ortsunabhängigkeit. Der Techniker vor Ort verfügt über eine AR-Brille und überträgt sein Sichtfeld an den Remote-Experten am Computer im Büro (grüner Pfeil in Bild 3 links). Über die Tracking-Sensoren zur räumlichen Verortung wird in Kombination mit der Kamera ein texturiertes 3D-Umgebungsmodell erzeugt (Bild 3 rechts, dazu mehr in Teil 2 der Publikation). Die zugeschalteten Experten treffen die Auswahl zwischen einer First-Person-View und einer Third-Person-View. Erstere überträgt den Remote-Experten ein Live-Bild der AR-Brille, und sie sehen dasselbe Bild wie die Person vor Ort. Die Third-Person-View bietet den Remote-Experten die Gelegenheit, sich unabhängig des aktuellen Blickfeldes der AR-Brille einen eigenen Überblick über die gesamte Umgebung zu verschaffen. In dieser Ansicht steht den Remote-Experten auch das kontinuierlich mitgescannte texturierte 3D-Umgebungsmodell zur Verfügung. Die Remote-Experten können Skizzen und Markierungen in das Bild am Computer einzeichnen oder Bilder einfügen, die mit dem 3D-Modell der AR-Brille verknüpft und somit räumlich verortet den AR-Brillen tragenden Personen in ihrem Blickfeld eingeblendet werden (rote Pfeile in Bild 3 links). Zusätzlich dazu erlaubt das Remote-Expert-System den Remote-Experten Objekte, die im 3D-Umgebungsmodell erfasst wurden, zu bewegen und somit ebenfalls Hilfestellungen zu erstellen (z. B. bei Wartungsarbeiten).

3.2.6 Gebäudetechnik

Bild 4 gibt einen Überblick über AR-Anwendungsfälle im Bereich der Gebäudetechnik. In der Planungsphase können Vertreter verschiedener Gewerke über AR-Brillen dasselbe BIM-Modell aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten. Weist ein Besprechungsteilnehmer mittels verorteter 3D-Skizze auf ein Problem hin, sehen alle Beteiligten die Skizze aus ihrem Blickwinkel. Durch Ein-/Ausblenden einzelner IFC-Entitäten sowie einer beliebigen Anpassung der Größe der Darstellung können potenzielle Problemstellen effizient analysiert werden. Während der Bauausführung hilft AR bei der frühzeitigen Erkennung von Konfliktstellen und der Installation der TGA-Ausstattung durch Überlagerung des TGA-Fachmodells mit der Realität. Des Weiteren

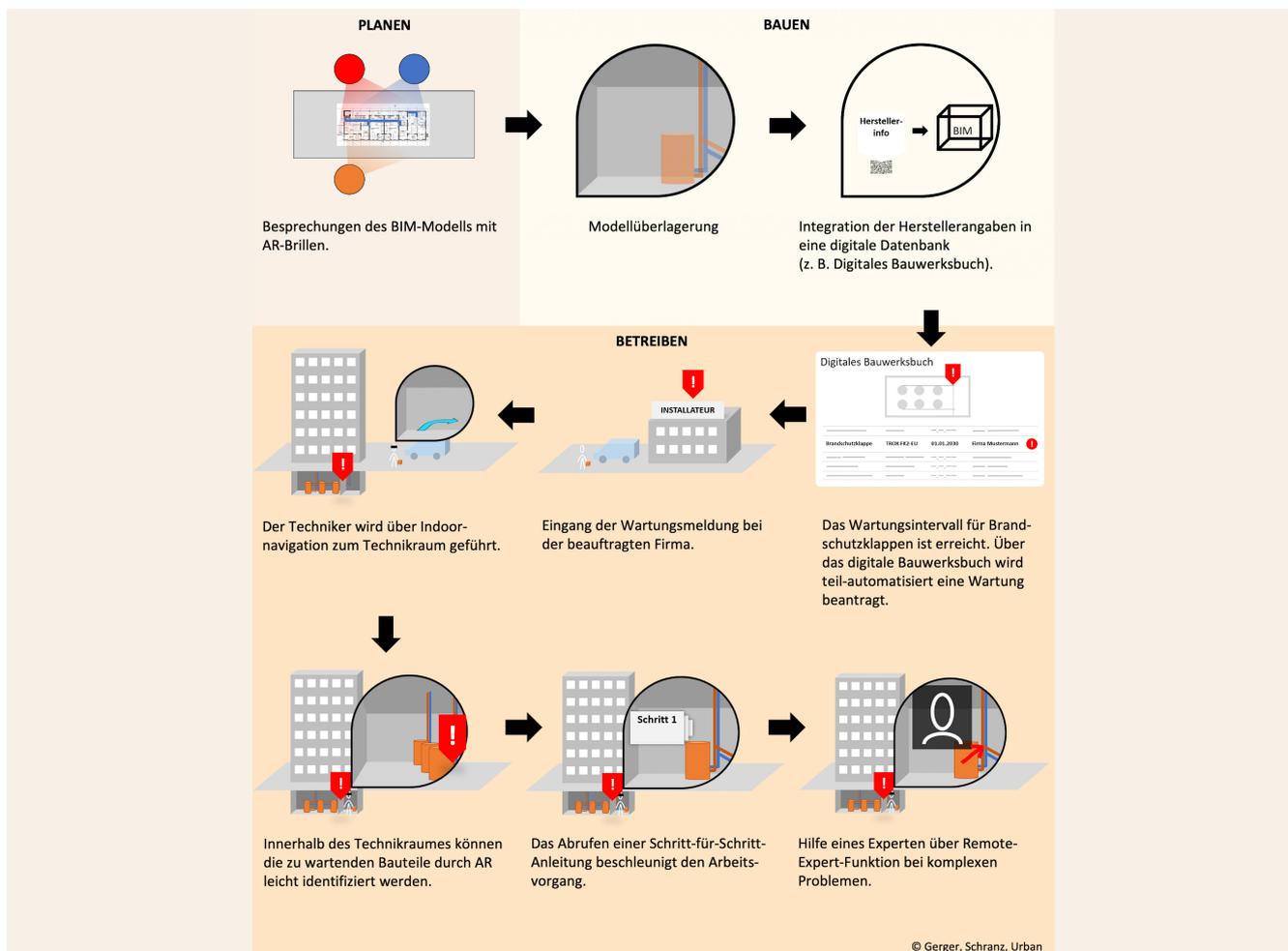


Bild 4. Überblick AR-unterstützter Prozesse im Bereich TGA [5] Abb.: Gerger, Schranz, Urban
 Fig. 4. Overview of AR-supported processes in the area of HVAC [5] Source: Gerger, Schranz, Urban

ren können Herstellerinformationen zu wartungsrelevanten Bauteilen in das BIM-Modell rückgespielt werden. Während der Betriebsphase des Gebäudes werden Wartungstechniker nach automatisiertem Eingang einer Wartungsmeldung zum betreffenden Objekt geschickt. Vor Ort können die betreffenden Bauteile durch Indoornavigation über die AR-Brille rasch identifiziert werden. Die Möglichkeit, eine Schritt-für-Schritt-Anleitung oder einen Experten hinzuschalten, beschleunigen die Arbeitsvorgänge deutlich.

3.2.7 Wartungsarbeiten und Schulungen

Branchenübergreifend bietet AR große Potenziale im Bereich der Arbeitszeitverkürzung von Wartungen. Die Erkenntnisse aus anderen Sektoren, wie dem Maschinenbau [15], lassen sich direkt übertragen und beispielsweise im Bauwesen bei TGA-Wartungsarbeiten anwenden. Mithilfe von virtuellen Schritt-für-Schritt-Anleitungen können standardisierte Prozesse erheblich beschleunigt werden. Künftige Kombination mit KI erlaubt die situationsabhängige Gestaltung von Anleitungen. Im Bereich von Schulungen können standardisierte Arbeitsschritte durch AR teil-virtuell geübt werden. Ein Pionier auf diesem Gebiet ist das Unternehmen Soldamatic IE, das eine Hard- und Softwareplattform für AR-unterstütztes Schweißstraining anbietet [16]. Durch den

Einsatz von AR können die Ausbildungszeit verkürzt und die Kosten deutlich gesenkt werden. Einen zentralen Aspekt könnte hier die sogenannte Gamification spielen [17]. Durch teil-virtuelles Durchführen von Arbeitsschritten und den Einbau von zum Beispiel positiver Rückmeldungen und Fortschrittsüberblick – anstatt umfangreiche Lernunterlagen durchzulesen – wird die intrinsische Motivation gesteigert und mögliche negative Folgen aus Leseschwächen sowie Hörbeeinträchtigungen können abgemildert werden. Die einzelnen Schulungsmodulare können aufgabenbezogen und bauphasenabhängig angeboten werden. In Gesprächen mit Baufirmen zeigten diese daran ein großes Interesse, im Besonderen bei der Arbeitssicherheitseinweisung.

3.2.8 Automatisches Erkennen von Änderungen

Großes Potenzial für die Bauaufsicht und Bauleitung bietet die von DAQRI vorangetriebene Entwicklung eines Change-Detection-Systems (Bild 5). Durch die Überlagerung verschiedener Modelle mit der realen Umgebung inklusive einer Überprüfung auf Veränderungen (Changes) und visueller Hervorhebung in Echtzeit bieten sich vielfältige Möglichkeiten. Beispielsweise könnte zur Überprüfung des Baufortschrittes die Realität mit dem BIM-Modell und den in der IFC-Struktur bauteilabhängigen Errichtungszeitspannen oder die Realität mit einem Scan-Modell der



Bild 5. HMD-Screenshots: Alter Zustand (links), Neuer Zustand (mitte) und Change-Detection in Echtzeit (rechts) *Abb.: DAQRI*
 Fig. 5. HMD-Screenshots: Former state (left), new state (middle) and change detection in real time (right) *Source: DAQRI*

letzten Baustellenbegehung verglichen werden [18]. Dies unterstützt zum Beispiel die Bauaufsicht, die gezielt auf die wesentlichen Veränderungen hingewiesen wird. Der Einsatz dieses Systems ist allerdings erst langfristig zu erwarten, da eine hohe Rechenleistung vor Ort erforderlich ist.

4 Anforderungen aus der Anwendungsanalyse

4.1 Entwicklung einer Anforderungsmatrix

Auf Basis der Anwendungsmöglichkeiten definierten die Autoren Anforderungen an und von AR [5]. Die Anforderungen fallen in vier Kategorien:

- Verortung
- Software und Funktionen
- Hardware
- Umwelteinflüsse

Zu den Anforderungen der Verortung gehören bspw. Verortungsgenauigkeit, QR-Codierung, GPS-Unterstützung, markerless orientation. Software- und Funktionsanforderungen beinhalten Fragen zur Informationsdichte (min. LOI/LOG) der verwendeten BIM-Modelle, Closed-Loop-Datenverarbeitung, Modellüberlagerung, Einblenden semantischer Informationen, Setzen von Tags, Scan der Umgebung etc. Abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall ist eine gewisse Informationsdichte des BIM-Modells erforderlich, die über die Begriffe Level of Geometry (LOG) und Level of Information (LOI) definiert wird. Hardwareanforderungen betreffen die Art der Hardware, höhere Hardware-Anforderungen aufgrund des Einsatzes von KI, zusätzliche Funktionalitäten wie Wärmebildkamera und andere Sensoren, Schutzklasse etc. Umwelteinflüsse stellen vor allem Anforderungen an den Einsatz von AR, wie die Beeinträchtigung der Sensoren durch ungünstige Lichtverhältnisse und besondere Wetterlagen. Diese Anforderungen stellen die Autoren in einer Anforderungsmatrix für alle definierten Anwendungsfälle zusammen. **Bild 6** zeigt einen Ausschnitt daraus.

Beispielsweise wird für die Überlagerung des TGA-Fachmodells mit der Realität eine hohe Verortungsgenauigkeit benötigt, da sonst eine Prüfung auf Konfliktstellen unmöglich wäre. TGA-Fachmodelle gehen über den Umfang der Baueinreichungsplanung hinaus und unterliegen somit den Anforderungen an die Ausführungsplanung LOG/LOI 400. Um Herstellerinformationen von wartungsrelevanten Bauteilen ins BIM-Modell zu übertragen, ist eine Closed-Loop-Datenverarbeitung erforderlich. Eine allgemeine Modellüberlagerung ist aber auch ohne dieses Feature möglich, deshalb ist die Zuordnung optional in der Tabelle angegeben. Als Hardware kommen sowohl Mobilgeräte (Smartphone/Tablet) als auch HMD-Geräte (AR-Brille) in Betracht.

Im Folgenden werden Anforderungen hinsichtlich Verortungsgenauigkeit, minimaler Informationsdichte geometrischer oder semantischer Informationen, des Datenaustauschs (Closed-Loop-Datenverarbeitung) und an die Hardwaremöglichkeiten genauer betrachtet.

4.2 Verortungsgenauigkeit

Bei Kollisionsprüfungen in der Planungsphase werden mehrere virtuelle Modelle, die über definierte Ursprungspunkte referenziert sind, miteinander verglichen. Um dieses Konzept über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks anwenden zu können, müssen reale (Bauzustand) und virtuelle Modelle (BIM) überlagert werden. Die Herausforderung stellt dabei die maßstäbliche, räumlich genau verortete Darstellung virtueller Inhalte dar. Zu diesem Zweck sind Tracking-Systeme erforderlich. Dazu zählt die Gesamtheit aus verschiedenen Sensoren sowie Schätzalgorithmen, die eine möglichst exakte räumliche Positionsbestimmung sicherstellen. Aktuell können vier Ansätze im Bereich der Verortungstechnik identifiziert werden: Über Referenzpunkte (z. B. QR-Codes), mittels Vektoreingabe, per Definition von drei nicht parallelen Flächen und markerless (frei in der Umgebung). Letztere Möglichkeit bietet einen deutlich eingeschränkten Anwendungsbereich, da keine Referenzierung zwischen virtuellen und realen Elementen erfolgt. Bei der Verortung mittels Referenzpunkte können unter anderem QR-Codes als Kalibrierungspunkte dienen. Referenzpunkte werden AR-branchenüblich Features genannt – auch in diesem Artikel. Diese werden in beliebigen Abständen (z. B. 5 m) in der realen Umgebung angebracht. Um einen Abgleich zu ermöglichen, ist es notwendig, deren Positionen ebenfalls im virtuellen Modell einzutragen. Dieser Ansatz benötigt somit einigen Vorbereitungsaufwand und hat den Nachteil, dass physische Objekte (QR-Codes) auf der Baustelle angebracht werden müssen, beispielsweise an den Rohbauwänden, und damit nachfolgende Arbeiten behindern oder durch sie wieder zerstört oder verdeckt werden.

Einfacher gestaltet sich dagegen die Verortung mittels Vektoreingabe (**Bild 7**). Im virtuellen Modell wird eine Bezugskante definiert und anschließend dieselbe Kante in der Realität durch Start- und Endpunkt (Vektor) ausgewählt. Durch die Angabe der Länge zwischen den beiden Punkten können der Maßstab und – anhand der Startposition und Richtung des Vektors – die räumliche Lage bestimmt werden. Dem gleichen Prinzip folgt die Verortung über drei Flächen. Zuerst werden diese im virtuellen Modell und anschließend in der Realität ausgewählt. Im Hinblick auf Toleranzmaße erfüllen die Systeme noch nicht alle Ansprüche, die sich aus den baustellenspezifischen Anwendungen ergeben. Daher arbeitet auch das For-

ANWENDUNGEN	ANFORDERUNGEN					
	Verortungsgenauigkeit (Überlagerung real-virtuell)	min. LOG/LOI	Closed-Loop- Datenverarbeitung	Überlagerung mit Realität	Einblenden semantischer Informationen	Mobilgerät (M) AR-Brille (B)
Schalungstechnik - Modellüberlagerung	–	–	–	•	–	M
Überprüfung der Bewehrung	•	400	•	•	•	M
TGA - Modellüberlagerung	•	400	○	•	○	M / B
Baudokumentation - Abrufen von Bauteilinformationen	○	300	–	•	•	M / (B)
Baudokumentation - Anmerkungen/Freigaben	○	300	•	•	•	M / (B)
Visualisierung bei Besprechungen	–	200	–	–	•	(M) / B
Baubehörden - Unterstützung von Werkmeistern	•	300	–	•	•	M / B
Baubehörden - Stärkung der Bürgerbeteiligung	○	200	–	•	•	M
Baugrubenaushub inkl. Darstellung der Leitungsführ.	•	500	–	•	○	B
Schalungstechnik - virtuelles Aufreißen	•	400	–	•	–	B
Schalungstechnik - Schalungsabnahme	•	400	○	○	•	M / (B)
Baudokumentation - "Change-detection"	•	300	○	•	○	B
Remote-Expert-System	•	–	–	•	•	B
Wartungsarbeiten	•	500	•	–	•	B
Schulungsmodule	○	–	–	•	•	B

Legende
 • hohe Anforderung/hohe Priorität M Mobilgerät (Smartphone/Tablet)
 ○ mittlere Anforderung/Optional B HMD-Gerät (AR-Brille)
 – niedrige Anforderung/nicht erforderlich

© Gerger, Urban

Bild 6. Anforderungsmatrix wichtiger AR-Anwendungen [5]
 Abb.: Gerger, Urban
 Fig. 6. Requirement matrix of important AR use cases [5]
 Source: Gerger, Urban

schungsteam an der Verbesserung des baustellentauglichen Trackings.

Die Sensoren für das Tracking unterscheiden sich in Abhängigkeit der verwendeten AR-Hardware. Während Mobilgeräte zur räumlichen Lagebestimmung auf Kamera, Inertial Measurement

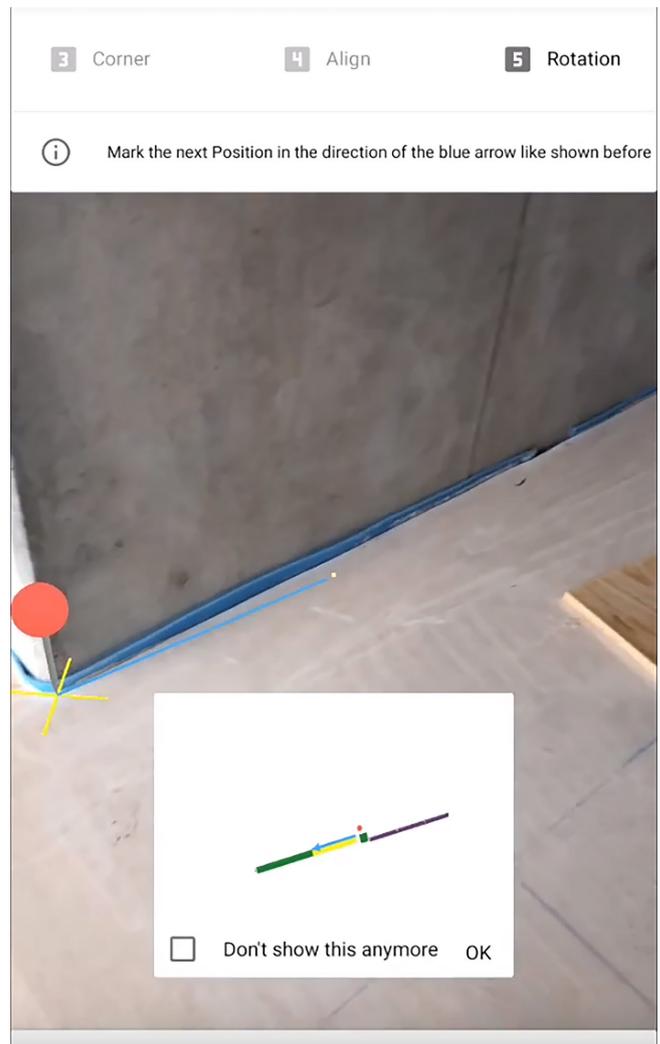


Bild 7. Verortung über Eingabe eines Vektors [9] Abb.: Gamma AR
 Fig. 7. Localization by entering a vector [9] Source: Gamma AR

Unit und vor allem leistungsstarke Algorithmen zurückgreifen, stehen AR-Brillen auch Infrarotkameras für die Tiefenbestimmung zur Verfügung [19]. Darauf aufbauend liefern HMD-Geräte bessere Verortungsergebnisse. Die zusätzlichen Sensoren der AR-Brillen können aber nicht nur zur Verortung genutzt, sondern auch für 3D-Scans der Umgebung oder zur Darstellung von Wärmebildern verwendet werden. Diese Scans bilden die Grundlage für die Baufortschrittsfeststellung mittels Change-Detection und für das Remote-Expert-System. Die Infrarot-Kamera generiert ein digitales Punkteraster, das über eine Software mit den grafischen Informationen der Kamera zu einem texturierten 3D-Modell zusammengefügt wird. Die Qualität dieser Scan-Modelle wird stark durch die vorherrschenden Lichtverhältnisse sowie die Oberflächen der Umgebungsmaterialien beeinflusst. Untersuchungen zur Verortungsgenauigkeit sind Thema des zweiten Teils dieses Artikels.

Eine besondere Herausforderung für den Einsatz von AR-Tools auf der Baustelle stellen die erheblich variierenden Lichtverhältnisse dar. Von Dunkelheit mit künstlicher Beleuchtung im Tunnelbau bis hin zu greller Mittagssonne im Hochbau müssen die eingesetzten Geräte unter allen Bedingungen gute Ergebnisse erzielen. Schwierigkeiten bereiten vor allem helle Situationen.

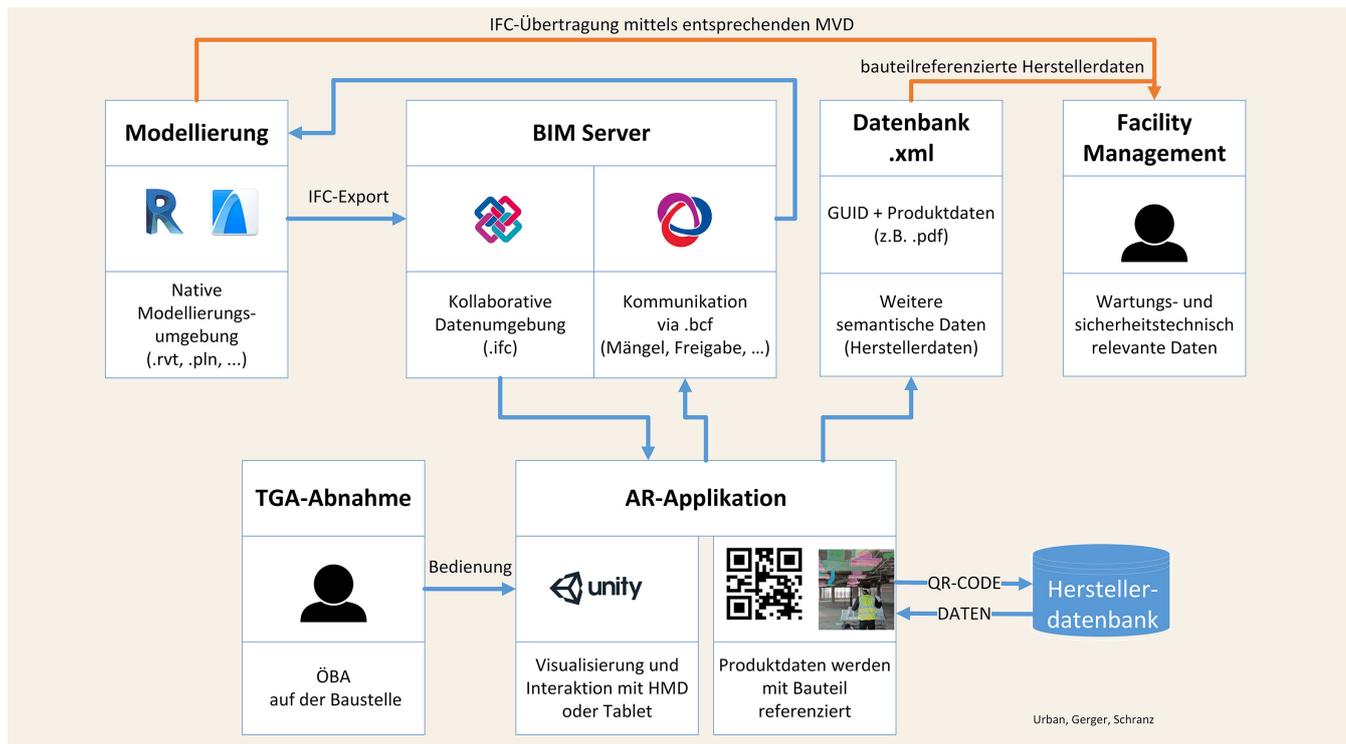


Bild 8. Closed-Loop-Datenkommunikation zwischen AR-Brille und BIM-Modell *Abb.: Urban, Gerger, Schranz*
 Fig. 8. Closed loop data communication between AR glasses and BIM model *Source: Urban, Gerger, Schranz*

Der natürliche Anteil an Infrarotstrahlung im Sonnenlicht führt zu Störungen der Infrarotkameras bei AR-Brillen [19]. Erschwerend hinzu kommen oftmals recht glatte, einfarbige Oberflächen im Bauwesen, wie Betonelemente und weiß verputzte Wände. Von diesen Problemen betroffen sind aufgrund der Infrarotsensoren nur HMD-Geräte.

4.3 Informationsdichte der Modelle

Die Grundlage der Informationsüberlagerung stellt das BIM-Modell dar, das über den IFC-Standard in die AR-Software übertragen wird. Der Umfang der Informationen eines BIM-Modells wird in den dem Baufortschritt angepassten LOG/LOI angegeben. Die Bandbreite reicht dabei von LOG/LOI 100 (3D-Darstellung in der Vorentwurfsphase) bis zu LOG/LOI 500 (As-built-Modell für Betriebsphase).

Mit steigender Informationsdichte steigt die Datenmenge exponentiell an. Daher ist die Wahl der notwendigen Informationsdichte äußerst wichtig. Für die Visualisierung während einer Besprechung oder die Bürgerbeteiligung während eines baubehördlichen Verfahrens reicht oft LOG/LOI 200 aus. Für die TGA-Modellüberlagerung oder das virtuelle Aufreißen der Schalung ist LOG/LOI 400 erforderlich. Nicht immer ist neben der geometrischen Information auch die Ausgabe semantischer Informationen notwendig. Für einzelne Anwendungsfälle reicht eine hohe geometrische Detailliertheit, während die Anzeige semantischer Informationen weniger wichtig ist.

Die Rechenleistung aktuell verwendeter Hardware (HMD, Smartphone oder Tablet) stößt aufgrund der zu verarbeitenden Datengröße der BIM-Modelle an ihre Grenzen. Folglich werden unterschiedliche Ansätze zur Datenreduktion entwickelt. Getestet werden aktuell die Möglichkeit der Beschränkung der Sichtweite,

das Laden einzelner Räume sowie das selektive Laden von semantischen Informationen erst per Auswahl des Objekts.

4.4 Datenaustausch – Closed-Loop-Datenverarbeitung

Gegenwärtig findet der Informationsfluss in vielen Anwendungen oftmals nur in eine Richtung vom BIM-Modell zum AR-Tool statt und beschränkt somit die Anwendungen auf Visualisierungsmöglichkeiten. Aus Sicht der Autoren sollte AR nicht nur dazu dienen, BIM in die Bauausführung zu bringen, sondern auch umgekehrt Informationen der Baustelle in das BIM-Modell. Dafür braucht es einen bidirektionalen Informationsaustausch zwischen AR- und BIM-Modell. Im Forschungsprojekt AR-AQ-Bau arbeiten die Projektpartner an einer Closed-Loop-Datenkommunikation von Informationen von der AR-Brille auf der Baustelle in Form von Kommentaren, Bildern sowie anderen semantischen Informationen ins BIM-Modell. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten zur Erfassung des Baufortschrittes oder von Herstellerdaten wartungsrelevanter Bauteile (z. B. Brandschutzklappen). **Bild 8** zeigt diese geschlossene Datenkommunikation zwischen AR-Brille und BIM-Modell. Der Datenweg vom Modell zur AR-Brille (AR-Applikation) erfolgt über die kollaborative Datenumgebung.

Im Bereich der Feststellung des Baufortschrittes können in der ersten Phase einzelne Bauteile über ein AR-Interface während Baustellenbegehungen abgenommen werden. AR bietet das Potenzial, die Erstellung von As-built-Modellen zu erleichtern. Durch die Scan-Funktion können beispielsweise Kanalrohre und Elektroleitungen nach deren Einbau aufgenommen werden. Das Scan-Modell wird anschließend mit dem TGA-Modell LOG/LOI 400 überlagert und entsprechend der Ausführung angepasst. Das entstandene LOG/LOI-500-Modell kann bei künftigen Erdarbeiten (z. B. Baugrubenaushub) Aufschluss über die genaue Lage etwa-

ger Rohre und Leitungen geben und somit Schäden verhindern. Voraussetzung dafür ist eine ausreichend hohe Genauigkeit des Scan-Modells, die mit aktuellem Stand der Technik noch nicht gegeben ist.

Um ein As-built-Modell für den Betrieb zu erhalten, sind geometrische Informationen und der Status der Freigabe nicht ausreichend. Über die AR-Brille können Herstellerinformationen zu Bauteilen mittels QR-Codes oder RFID-Chip über den Webserver abgerufen werden und mittels Gestik mit dem BIM-Modell referenziert werden. Mittels Referenzierung im BIM-Modell stünden dem Facility-Management wartungs- und sicherheitstechnisch relevante Informationen in der Betriebsphase zur Verfügung.

4.5 Hardwaremöglichkeiten

Derzeit werden zwei Arten von Hardwareprodukten eingesetzt: Tablets/Smartphones und Head Mounted Displays (HMD). In letztere Kategorie fallen AR-Brillen/Datenbrillen, zum Beispiel Microsoft HoloLens oder DAQRI Smart Glasses. Tablets/Smartphones sind praktisch jederzeit verfügbar und können relativ kostengünstig eingesetzt werden.

Die Steuerung mittels Eye-Tracking oder Gesten ermöglicht eine Steuerung ohne Controller. Das System funktioniert ähnlich der Maus am Computer. Ein Symbol (z. B. ein Kreis) stellt den aktuellen Fokus der Augen dar, analog zum Mauszeiger. Durch die Bewegung der Augen wird das Symbol über das AR-Interface gesteuert. Will man eine Schaltfläche anklicken, verweilt man mit dem Blick ein paar Sekunden an der entsprechenden Stelle. Neuere Systeme steigen auf Gestensteuerung um.

5 Arbeitssicherheit

Vor dem breiten Einsatz von AR-Hardware auf Baustellen ist noch ein wichtiges Problem zu lösen: Die Arbeitssicherheit. Dies betrifft beide Gerätekategorien.

Durch die Verwendung von Smartphone oder Tablet für AR-Anwendungen ist die Wahrnehmung der Umgebung oft eingeschränkt. Der Fokus richtet sich auf das Gerät in der Hand, die Umgebung wird wesentlich weniger wahrgenommen. Der Einsatz von Mobilgeräten fällt in Österreich derzeit in eine arbeitsrechtliche Grauzone. Zwar spricht nichts gegen eine Verwendung im Stand, jedoch stellt die Verwendung beim Gehen eine Gefahr dar. Ein dezidiertes Verwendungsverbot gibt es derzeit nicht, jedoch könnten Bauherren Verbote aussprechen.

AR-Brillen besitzen den Vorteil, dass die Umgebung besser wahrgenommen wird, jedoch ist auch dort das Sichtfeld stark eingeschränkt. Einen wichtigen sicherheitsrelevanten Vorteil bieten AR-Brillen: Das Freibleiben der Hände. Sofern der Anwender die Hände freibehalten muss, kommen nur AR-Brillen in Frage. Geräte verschiedener Hersteller bieten derzeit ein Sichtfeld von ungefähr 50° in der Diagonalen an. Zum Vergleich: Das menschliche Auge deckt einen Bereich von circa 225° diagonal ab. Die Einschränkung des peripheren Sichtfeldes stellt auf Baustellen ein Sicherheitsrisiko dar (Wahrnehmung herannahender Baumaschinen) und verhindert eine ausreichende Sicherheitszertifizierung. Zwar gibt es immer wieder vielversprechende Entwicklungen zur Steigerung des Sichtfeldes, wie das Foveated AR-Konzept (Steigerung des Sichtfeldes auf 100°) [20]. Einige Experten gehen allerdings davon aus, dass es bei diesem Thema erst mittelfristig zu tragfähigen Lösungen kommen wird [21].

Weitere Herausforderungen stellen die Kompatibilität mit der persönlichen Schutzausrüstung und der oftmals zweigeteilte Aufbau dar. Die Konstruktion aktueller HMD-Geräte macht vielfach eine Kombination mit auf Baustellen vorgeschriebenen Schutzhelmen unmöglich. Eine nennenswerte Ausnahme stellt hier die Kooperation der Firma Trimble Connect und Microsoft dar, aus der kompatible Varianten eines eigenen Bauhelmsystems mit Microsofts Modellen HoloLens1 und HoloLens2 hervorgegangen sind [22]. Die Verbindung von AR-Brille und Schutzhelm über spezielle Adapter erlaubt eine Zertifizierung nach EN 397 für Industrieschutzhelme. Der Aufbau besteht aus zwei Einheiten: Einer visuellen Einheit vor den Augen und einer Rechner-Einheit, die am Rücken, hinten am Helm oder am Gürtel getragen wird. Zu beachten ist, dass beispielsweise durch die Kabelverbindung der Einheiten untereinander die Gefahr auf Baustellen besteht, an Hindernissen hängen zu bleiben.

Vor einem breiten Einsatz von AR-Hardware auf Baustellen sind daher die Geräte in Bezug auf die Anforderungen der Arbeitssicherheit noch weiterzuentwickeln.

6 Fazit

Augmented Reality (AR) ist eine prägende Technologie, die ihren Weg immer stärker in den Bauprozess findet. Im Zuge des Forschungsprojekts AR-AQ-Bau konnten die Autoren über 40 Anwendungsfälle recherchieren und definieren [5], einige davon wurden in diesem Artikel beispielhaft vorgestellt. Diese Anwendungsfälle zeigen, dass AR einen wesentlichen Mehrwert für viele Prozesse im Zyklus Planen, Bauen, Betreiben bringen kann.

Der Anwendungsanalyse folgte eine Anforderungsanalyse. Aus dieser erstellten die Autoren eine Anforderungsmatrix [5], von der ein Teil in diesem Artikel vorgestellt wurde. Diese zeigt, dass einige Anwendungsfälle bereits umsetzbar sind, andere jedoch einer technischen Weiterentwicklung der Hard- und Software bedürfen. Für den Einsatz von AR-Brillen im Baubetrieb stellt bspw. die Baustellentauglichkeit des Trackingsystems ein wesentliches Kriterium dar. Besonders ungünstige Lichtverhältnisse (zu viel Sonne oder zu wenig Licht) oder ungünstige Oberflächenverhältnisse (zu gleichmäßig graue oder weiße Oberflächen) stören eine genaue Verortung. In Teil 2 dieses Artikels werden sich die Autoren mit dieser Problematik und den Arbeiten an einem baustellentauglichen Trackingsystem beschäftigen.

Die raschen Entwicklungen in der AR-Technologie und im Projekt AR-AQ-Bau zeigen das große Potenzial dieser Technologie. Daher gehen die Autoren davon aus, dass in wenigen Jahren der Einsatz von AR zum Alltag auf Baustellen gehören wird.

DANKSAGUNG

Das Projekt AR-AQ-Bau wird über die FFG-Förderschiene Stadt der Zukunft gefördert. Stadt der Zukunft ist ein Forschungs- und Technologieprogramm des BM für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Es wird im Auftrag des BMK von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft gemeinsam mit der Austria Wirtschaftsservice Gesellschaft mbH und der Österreichischen Gesellschaft für Umwelt und Technik (ÖGUT) abgewickelt. Die Autoren bedanken sich für die Förderung.

Literatur

- [1] 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, S. 73-82.
- [2] 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.
- [3] Azuma, R.: A Survey of Augmented Reality. In: Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 6 (1997), Iss. 4, pp. 355-385.
- [4] Urban, H.; Schranz, Ch.; Gerger, A.: BIM auf Baustellen mit Augmented Reality. In: bauaktuell 10 (2019), Heft 5, S. 192-196.
- [5] Gerger, A.; Schranz, C.; Urban, H.: Augmented-Reality-Use-Cases im Bauwesen: Potentiale und Anforderungen. Wien, Zentrum Digitaler Bauprozess, TU Wien, Forschungsbericht, 2019.
- [6] Doka GmbH: Doka AR-VR-App [Software]. Juli 2019, <https://www.doka.com/at/home/apps/augmented-reality-app/> [Zugriff am: 17.02.2020].
- [7] Schöck Bauteile GmbH: Schöck S-CONSTRUCT app [Software]. Februar 2020, <https://www.schoeck.de/de/s-construct/> [Zugriff am: 28.03.2020].
- [8] Haponiuk, B.: Entwicklung eines Augmented Reality Interfaces für TGA-Abnahme. Wien, TU Wien, Diplomarbeit, 2020.
- [9] Gamma Technologies: Gamma AR app [Software]. Juli 2019, <https://gamma-ar.com/de/gamma-ar-german/> [Zugriff am: 09.03.2020].
- [10] ÖNORM A 6241-2: Digitale Bauwerksdokumentation – Teil 2: Building Information Modeling (BIM) – Level 3-iBIM. Ausgabe Juli 2015.
- [11] Stadt Wien: BRISE-VIENNA – Projektbeschreibung. 2020, <https://digita les.wien.gv.at/site/projekt/brisevienna/> [Zugriff am: 28.03.2020].
- [12] Stadt Wien: Beteiligung und Masterplan für partizipative Stadtentwicklung. 2020, <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/partizipation/masterplan/> [Zugriff am: 28.03.2020].
- [13] Giannopoulos, I.: 3D-GIS-AR Project: High Precision Outdoor Mixed Reality – Visualization and Interaction with georeferenced data. 2019, <https://geoinfo.geo.tuwien.ac.at/index.php/projects/> [Zugriff am: 28.03.2020].
- [14] Doka GmbH: Doka Campus: Die Welt der Schalung mit allen ihren Facetten auf der bauma 2019. 2019, https://www.doka.com/at/news/press/Doka_Campus_2019 [Zugriff am: 09.10.2019].
- [15] Daqri: Siemens cases study: Benefits of using Augmented Reality to gas burner assembly training. 2019, <https://campaigns.daqri.com/siemens-gas-burner/read.html> [Zugriff am: 20.06.2019].
- [16] Soldamatic IE: Augmented Training vs. Traditionelles Training. 2020, <https://www.soldamatic.com/> [Zugriff am: 09.03.2020].
- [17] Deci, E.; Ryan, R.: Self-Determination Theory: A Macrotheory of Human Motivation, Development, and Health. In: Canadian Psychology, Vol. 49 (2008), pp. 182-185.
- [18] Daqri: Worksense – Tools for the digital workforce. 2019, <https://daqri.com/worksense/> [Zugriff am: 09.03.2020].
- [19] Irschik, T.; Urban, H.; Schranz, C.: Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen von Augmented Reality im Bauprozess mit DAQRI-Smart-Glasses. Wien, Zentrum Digitaler Bauprozess, TU Wien, Forschungsbericht, 2020.
- [20] Kim, J.; Jeong, Y.; Stengel, M. et al.: Foveated AR: Dynamically-Foveated Augmented Reality Display. In: ACM Trans. Graph., Vol. 38 (2019), Iss. 4, pp. 99:1-99:15.
- [21] Bastian, M.: AR-Brille: Laut Ingenieur kein Durchbruch in Sicht. Mixed.de Online-Magazin für Mixed Reality, 2019, <https://mixed.de/ar-brille-laut-ingenieur-kein-durchbruch-in-sicht/> [Zugriff am: 09.03.2020].
- [22] Trimble Inc.: Trimble XR10 with HoloLens 2. 2020, <https://mixedreality.trimble.com/> [Zugriff am: 09.03.2020].



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

christian.schranz@tuwien.ac.at

Abb.: Robert Rainer

Alexander Gerger

alexander.gerger@tuwien.ac.at

Dipl.-Ing. Harald Urban, B.Sc.

harald.urban@tuwien.ac.at

Technische Universität Wien
Zentrum Digitaler Bauprozess
Karlsplatz 13/234-01, 1040 Wien, Österreich