

Immersive Besprechungen im Lebenszyklus von Gebäuden auf Basis von digitalen BIM-Modellen

Immersive meetings in the life cycle of buildings based on digital BIM-models

Jan-Iwo Jäkel, Institut für Baumanagement, Digitales Bauen und Robotik im Bauwesen, RWTH Aachen University, 52070 Aachen, jaekel@icom.rwth-aachen.de

Christoph Jahnke, customQuake GmbH, 20457 Hamburg, c.jahnke@customquake.com

Markus Meyer Westphal., customQuake GmbH, 20457 Hamburg, mmw@customquake.com

Kurzfassung

Das Planen, Bauen und Betreiben eines Gebäudes involviert viele verschiedene Projektbeteiligte entlang des Lebenszyklus. Die Basis der Kommunikation und Kollaboration zur Entscheidungsfindung bilden zyklische Projektbesprechungen. Diese sind ortsgebunden und laufen zumeist unter Verwendung analoger Pläne und Dokumente ab. Für eine Optimierung, weitere Digitalisierung sowie Auflösung der Ortsabhängigkeit am Bauwerk können immersive Technologien in Verbindung mit digitalen BIM-Modellen von Gebäuden eingesetzt werden. Dieser Artikel stellt einen Ansatz für eine ortsunabhängige Baubesprechung unter Einbindung und Möglichkeit der Interaktion aller Akteure dar. Dabei wird die reale mit der digitalen Welt verknüpft. Als zentraler Punkt und Datenbasis des Geschehens dienen digitale Gebäudemodelle im Sinne der Methode Building Information Modeling (BIM). Außerdem werden immersive Technologien, wie erweiterte Realität (AR) und virtuelle Realität (VR), während der Besprechung als Ausgabe- und Interaktionstechnologien verwendet.

Im ersten Abschnitt des Artikels wird der Status Quo auf Basis einer Literaturanalyse erarbeitet. Darauf folgt die Vorstellung des theoretischen Konzepts unter Entwicklung eines Systemmodells. Im nächsten Schritt wird das Konzept anhand eines realen Demonstrator umgesetzt und validiert. Abschließend werden Weiterentwicklungsmöglichkeiten sowie noch bestehende Limitationen abgeleitet. Das Ergebnis des Artikels zeigt die Machbarkeit von ortsunabhängigen Baubesprechungen im Hochbau durch die Zusammenführung von BIM und immersiven Technologien

Abstract

The design, construction and operation of a building involves many different project participants along the life cycle. Periodic project meetings form the basis of communication and collaboration for decision-making. Such meetings are location-bound and mostly take place using analog plans and documents. For optimization, further digitization and resolution of the location dependency on the building, immersive technologies can be used in conjunction with digital BIM models. This article presents an approach for a location-independent construction meeting with the integration and possibility of interaction of all stakeholders. The real world is linked with the digital world. Digital building models in the context of the Building Information Modeling (BIM) method serve as the central component and data database of the approach. In addition, immersive technologies, such as augmented reality (AR) and virtual reality (VR), are used as output and interaction technologies during the meeting.

In the first section of the paper, the status quo is elaborated based on a literature review. This is followed by the presentation of the theoretical concept under development of a system model. In the next step, the concept is implemented and validated using a real demonstrator.

Finally, further development possibilities as well as still existing limitations are derived. The result of the article shows the feasibility of location-independent construction meetings in building construction by combining BIM and immersive technologies.

DOI: 10.17185/dupublico/79108



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (CC BY-NC 4.0)

1 Einleitung

In den letzten Jahren haben sich die Technologien der virtuellen Realität (VR), der erweiterten Realität (AR) und der gemischten Realität (XR) von einer Nischentechnologie zu einer akzeptierten Technologie für Visualisierungs- und Interaktionsmöglichkeiten entwickelt. Die möglichen Anwendungen erstrecken sich heute auf viele verschiedene Branchen. So wird die Technologie beispielsweise im Bildungswesen, in der Informations- und Kommunikationsbranche, im Gesundheitswesen oder in der Fertigungs- und Baubranche eingesetzt [1]. Mit XR lassen sich komplexe Strukturen und Prozesse in immersiven Umgebungen visualisieren, testen und optimieren [2–4]. Dadurch wird die grundsätzliche Nachvollziehbarkeit der Zusammenhänge erhöht und im gleichen Zuge werden die damit verbundenen Kosten reduziert [2, 5–7]. Herausforderungen bei der Integration immersiver Technologien bestehen dagegen auf der prozessualen und informationstechnischen Ebene [8–10]. Damit eine Kommunikation als natürlich und einfach wahrgenommen werden kann, bedarf es folglich der Verwendung von Elementen einer natürlichen Konversation im Interaktionsraum. Hierfür bieten spezielle Geräte (AR-Brille / VR-Headset) verschiedene Interaktionsmöglichkeiten [11–14], wie z.B. Markieren, Sprechen, Kommentieren, Hervorheben, etc. [15–17].

In den letzten Jahren wird die digitale Methode Building Information Modelling (BIM) immer mehr im Lebenszyklus von Gebäuden verwendet [18, 19]. Dabei dient ein digitales Gebäudemodell als zentrale Datenbasis für die gemeinsame Kollaboration aller Projektbeteiligten in der Planung, Ausführung sowie Betrieb und Rückbau [19]. So etablieren sich mit der Nutzung von BIM auch neue Rollen in der Projektorganisation [20]. Zugleich kann das digitale Modell in verschiedenen Anwendungsfällen und Detaillierungsgraden verwendet werden [19, 21, 22]. Auch Projektbesprechungen oder Qualitätskontrollen werden auf Basis von digitalen Gebäudemodellen abgewickelt [23–25]. Dennoch finden diese Besprechungen entweder vor Ort oder komplett digital statt. Eine Verknüpfung der beiden Möglichkeiten – reale und digitale Welt - für ortsunabhängige Besprechungen wird bislang noch nicht praktiziert.

Diese Forschungslücke schließt der Forschungsartikel mit dem Ziel der Darstellung eines holistischen Ansatzes einer immersiven Baubesprechungen. Diese ist ortsunabhängig unter der Fusion der realen und digitalen Welt. Dabei werden digitale Bauwerksmodelle als Datenbasis und immersive Technologien als Ausgabe- und Interaktionstechnik (VR/AR/Desktop) verwendet.

2 Methodisches Vorgehen

In diesem Artikel wird der erste Ansatz einer immersiven Besprechung auf Basis digitaler Bauwerksmodelle von Gebäuden durchgeführt. Der Artikel gliedert sich in drei Teile: (i) Stand der Technik, (ii) Entwicklung des Konzepts und (iii) Implementierung. Im ersten Teil wird der Status

Quo des Einsatzes von VR, AR und XR auf der Grundlage einer Literaturrecherche erarbeitet. In den beiden Unterkapiteln wird zum einen der allgemeine Einsatz von immersiven Technologien betrachtet. Zum anderen wird die Verwendung der Technologien in der Bauindustrie, speziell der Einsatz im Hochbau, analysiert. Nach der Identifikation der Forschungslücke im Status Quo wird im zweiten Teil das Konzept entwickelt. Der Fokus liegt in diesem Fall auf der Etablierung einer Mensch-Technik-Interaktion für ortsunabhängige Besprechungen. Die unterstützenden Technologien sind dabei BIM, AR, und VR.

Mit der Ortsunabhängigkeit geht die Verknüpfung der realen Welt mit der digitalen Welt einher. Dabei werden in beiden Welten unterschiedliche Handlungen der Nutzer durchgeführt, die für alle Projektbeteiligten vernommen werden können. Als Basis für die Besprechung werden digitale, dreidimensionale Modelle der Gebäude, sogenannte BIM-Modelle, verwendet. Das Konzept in diesem Artikel konzentriert sich auf Wohn- und Bürogebäude im Hochbau. Es werden die einzelnen prozessualen, technischen und informationstechnischen Anforderungen beschrieben und in einem Systemmodell visualisiert. Eine Implementierung und erste Validierung in Form eines „Proof-of-Concept (PoC)“ erfolgt an einem realen Demonstrator. So wird die grundsätzliche Machbarkeit einer immersiven Besprechung im Hochbau erprobt und bestätigt. Am Ende des Artikels wird eine kritische Bewertung der Ergebnisse vorgenommen und ein Ausblick auf die daraus resultierenden Forschungsfragen gegeben.

3 Stand der Technik

3.1 Allgemeines zu immersiven Besprechungen

Mit der Weiterentwicklung der immersiven Technologien werden Meetings zunehmend virtualisiert unter einer Fusion der realen und virtuellen Welt [26]. Dies erfordert den Einsatz von moderner Computertechnologie sowie spezieller Ausgabegeräte, wie z.B. AR-Brillen (z.B. Microsoft HoloLens) [27] oder VR-Headsets (z.B. Meta Quest 2) [28]. Darüber hinaus dient eine spezielle kollaborative Plattform als Basis der Interaktionen sowie als Lieferant der notwendigen Datengrundlagen (z.B. Microsoft Mesh Plattform) [29]. Dies ermöglicht den Nutzern eine agnostische Zusammenarbeit. Unabhängig vom verwendeten Endgerät können Nutzer mit ihrem eigenen Avatar in eine Sitzung eintreten und gemeinsam Aufgaben an einem virtuellen Objekt durchführen sowie verbal und gestisch Informationen darüber austauschen. Das entsprechende "Objekt" ist für jeden Nutzer rein virtuell und wird in seinen Raum projiziert [26, 30].

Ein AR-Ausgabegerät orientiert sich in der Regel an gemessenen Positionsunterschieden relativ zu seiner Umgebung und projiziert Hologramme in Bezug auf diese. Bei der Verwendung von SLAM-Algorithmen ist die Umgebung jedoch im Voraus unbekannt [31]. Daher kann die Zuordnung bzw. das Mapping von virtuellen Kontexten zur Umgebung in der Regel erst während der eigentlichen

Laufzeit erfolgen. Um dieses Problem zu lösen, wurden spezielle Rahmenwerke entwickelt, die das Koordinatensystem für eine optimierte Zentrierung und Projektion der virtuellen Welt in die reale Umgebung fixieren. Diese werden als "World-Locking"-Algorithmen bezeichnet [32–34]. Dadurch wird die Bereitstellung eindeutiger Referenzpunkte, auch "Ankerpunkte" genannt, von der realen Welt (z.B. QR-Codes) zur AR-Brille ermöglicht. So kann die Lokalisierung von Ankerpunkten der realen Welt mit vordefinierten Punkten des virtuellen Modells ergänzt werden [33, 34][31, 32]. In diesem Kontext gibt es auch vorgefertigte Bausteine, wie z.B. der von Microsoft entwickelte Framework namens "World Locking Tool" [35], dass im Rahmen von aktuellen Forschungsprojekten vielfältig eingesetzt wird [33, 36, 37].

Ansätze und Implementierungen von immersiven und kollaborativen Meetings werden in verschiedenen Szenarien in der wissenschaftlichen Gemeinschaft erforscht. Lee et al. präsentieren einen Ansatz für eine immersive Kollaborationsumgebung für das Handwerk unter Verwendung von AR-, VR- und LiDAR-Scan-Techniken [38]. Thanyadit et al. stellen in deren Artikel eine virtuelle Arbeitsumgebung zum Testen und Trainieren kollaborativer Laborarbeit unter Verwendung verschiedener Applikationsfunktionen dar [39]. Darüber hinaus stellen Lee und Yoo ein XR-Fernkollaborationssystem und dessen Umsetzung an den beiden Fallstudien Fernwartung und Kugelhahnwechsel vor [40]. Zudem beschreiben Mourtzis et al. eine Cloud-basierte Plattform für immersive Besprechungen für kollaboratives Produktdesign im Sinne einer digitalen Lernfabrik [41]. Ein spezieller Anwendungsfall der Microsoft Mesh-Plattform für immersive Besprechungen wird in dem wissenschaftlichen Artikel von Dong und Liu [30] behandelt.

3.2 Immersive Technologien in der Bauindustrie

Bei der fortschreitenden Etablierung der BIM-Methode in der Bauwirtschaft und der Schaffung einer qualitativen Datenbasis für weitere Technologien werden immersive Technologien in verschiedenen Bereichen eingesetzt. So wird beispielsweise die AR-Technologie bereits über den gesamten Lebenszyklus - Planung, Ausführung, Betrieb und Rückbau - eingesetzt [42]. Dabei wird die Technologie für Visualisierungen und Simulationen [43, 44], für die Kommunikation [45, 46] und die Informationsverarbeitung [47, 48] verwendet. Zusätzlich gibt es Anwendungsfelder im Bereich von Aus- und Weiterbildung [49, 50] und für Sicherheitsinspektionen [51, 52]. Darüber hinaus erfährt sie einen Nutzen auch direkt in der Bauausführungsphase, zum Beispiel bei der Baufortschrittsüberwachung [53] und der Schadenserkenkung benutzt [52, 54, 55]. AR-Technologien können aber auch zur Bewertung [56], Aktualisierung [45] und Validierung von digitalen Modellen [57] eingesetzt werden. Obendrein gibt es Ansätze, AR-Geräte für die Datenerfassung und Kommunikation auf der Baustelle einzusetzen [58]. Gleichzeitig zur AR hat die VR-Technologie ebenfalls in der Bauindustrie ein breites Anwendungsspektrum. So wird VR beispielsweise für Qualitätskontrollen in der Planungsphase, die Visualisierung und

Präsentation von BIM-Modellen sowie für das Einholen von Feedback von externen Personen eingesetzt [59, 60]. Des Weiteren werden VR-basierte Schulungen [61–63] sowie Baustellenüberwachungen in Verbindung mit BIM-Modellen durchgeführt [64].

Werden beide Technologien (AR und VR) in Kombination eingesetzt, spricht man auch von Mixed Reality (XR). Bei der Verwendung von XR dienen auch digitale BIM-Modell der Baustelle oder des Bauwerks als Datengrundlage. Catbas et al. stellen verschiedene Anwendungen des Einsatzes von XR zur Zustandsbewertung komplexer Gebäudestrukturen im Hochbau und der Infrastruktur vor [65]. Al-Adhami et al. verwenden XR-Debugger zur Qualitätsbewertung zwischen der realen Struktur und der digitalen Repräsentation [66]. Zusätzlich werden XR-Ansätze auch im Bereich der Baustellensicherheit angewendet und von Salinas et al. in ihrem wissenschaftlichen Artikel zusammengefasst [67]. Zusätzlich beschreiben Alizadehsalehi und Yitmen einen XR-basierten Ansatz für eine neuartige Fortschrittskontrolle mit digitalen Zwillingen auf der Baustelle [68].

3 Entwicklung des Konzepts

Um eine Abgrenzung und gleichzeitige Zusammenführung bereits geleisteter Teilarbeiten in diesem Bereich zu schaffen, werden im Folgenden die Kernaspekte der Zusammenarbeit in der XR identifiziert und mittels einer virtuellen Baubesprechung integriert/zugeordnet. Dabei werden im Konzept drei Hauptdomänen unterschieden:

1. Kohärenz von Virtualität und Realität
2. Informationsaustausch der beteiligten Parteien (verbale und nonverbale Kommunikation)
3. Visualisierung und Produktion von kontextuellen Informationen

Der erste Bereich des Konzepts beschreibt die Kohärenz von Virtualität und Realität. Die Kohärenz (in unserem Sinne die Übereinstimmung von virtueller und realer Umgebung, gleichbedeutend mit Synchronisation) hängt vom Grad des verwendeten Ausgabegeräts (VR/AR/Desktop-Computer) ab. Während ein navigierbares, detailliertes 3D-Modell auf einem Monitor für einen Desktop-Nutzer ausreichend erscheinen mag, sind die Anforderungen für eine Umsetzung in AR ungleich höher. Soll das 3D-Modell des Gebäudes auf ihr reales Gegenstück vor Ort projiziert werden, muss eine exakte Überlappung gewährleistet sein. Mit Hilfe des Toolkits "World Locking Tools" [35] [33] und aufgedruckten und im Raum verteilte QR-Codes sollen die virtuellen Daten einen festen Bezugspunkt in der Realität erhalten. Dies erhöht die Kohärenz der beiden Ebenen (Virtualität und Realität) und den Grad der Immersion des Nutzers. Ist die Kohärenz für jeden Nutzer individuell gewährleistet, werden die Positionen der einzelnen Nutzer relativ zum Gebäude über ein neu aufgebautes Netzwerk synchronisiert. Das Ergebnis ist ein synchronisierter Raum, in dem jeder Nutzer seine Position in Bezug auf das virtuelle

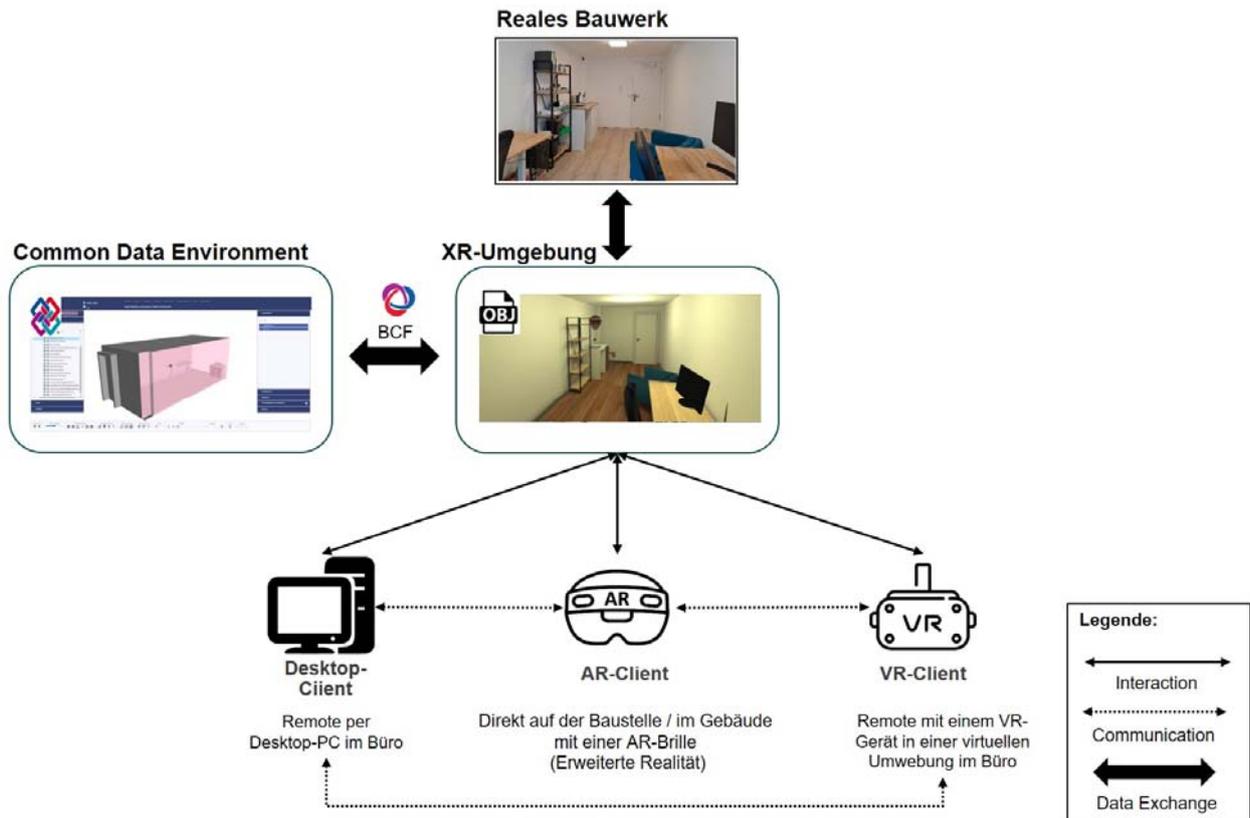


Bild 1 Systemmodell der immersiven Besprechung

Modell als kohärent wahrnimmt. Zudem wird auch die visuelle Darstellung der anderen Nutzer in Form ihrer Avatare als exakt und logisch mit deren Positionen wahrgenommen. Dies ist eine Grundvoraussetzung für den Informationsaustausch in der immersiven Sitzung.

Der zweite Bereich des Konzepts konzentriert sich auf den Austausch von Informationen zwischen den beteiligten Parteien. Dies impliziert eine verbale und nonverbale Kommunikation. Während die verbale Kommunikation (Sprache und Schrift) in vielen Bereichen der digitalen Arbeit Standard ist, gilt die nonverbale Kommunikation als Schlüsselfaktor einer immersiven Besprechung. In diesem Zusammenhang ist eine präzise Geste, z.B. ein "Zeigen" auf ein zu betrachtendes Objekt, effektiver als eine Beschreibung des Kontextes. Im Idealfall bietet die immersive Besprechung also sowohl verbale als auch nonverbale Kommunikationsmöglichkeiten. Diese Möglichkeiten sind immer abhängig von dem verwendeten Endgerät. Im Rahmen des in diesem Fachartikel entwickelten Konzeptes werden beide Kommunikationsmittel berücksichtigt (s. Bild 1). Sowohl die Möglichkeiten der Sprachsteuerung, als auch der Einsatz von Gesten sind im immersiven Meeting im Gebäude möglich. Die Basis der immersiven Baubesprechung ist ein digitales, objektorientiertes Gebäudemodell. Dies fördert die Zusammenarbeit und dient als konsistente Datenbasis. Das bedeutet, dass für alle Beteiligten immer die gleichen, aktuellen Daten im Modell transparent zur Verfügung stehen.

Der letzte Bereich befasst sich mit der Betrachtung und Erstellung von kontextbezogenen Informationen während der

immersiven Sitzung. Eine digitale und effiziente Methode für die Planung, Modellierung und Steuerung im Bausektor ist Building Information Modeling [79]. Die immersive Besprechung baut auf der BIM-Methode auf und ermöglicht einen bidirektionalen Datenaustausch zwischen der XR-Umgebung und einem Common Data Environment (CDE). So können die während des Meetings gewonnenen Erkenntnisse als semantische Informationen am Modell verortet und an das CDE übertragen werden. Das Gleiche gilt für die Verwendung neuer Daten aus dem CDE während der immersiven Sitzung in der XR-Umgebung. Auf diese Weise unterstützt das Konzept des immersiven Meetings auch die Idee einer einzigen Projektplattform, agierend als „Single-Source-of-Truth (SSoT)“ [80].

In diesem Kontext werden die digitalen Modelle in den offenen Datenformaten „Industry Foundation Classes (IFC)“ und „OBJ“-Format in den einzelnen Plattformlösungen verwaltet. Über die verschiedenen Endgeräte haben alle Teilnehmer die Möglichkeit auf Basis einer einheitlichen und transparenten Datenbasis (BIM-Modell) in Echtzeit zu kommunizieren. Dies kann durch Sprache, Chat oder iterativen Gesten in der realen Welt geschehen. Darüber hinaus kann eine genaue Sichtbarkeit des eigenen Standorts in Bezug auf das Gebäude von den anderen Gesprächsteilnehmern wahrgenommen werden. Jeder registrierte Nutzer kann sich über einen VPN-Client in die XR-Umgebung einloggen und mit dem entsprechenden Endgerät an dem immersiven Meeting teilnehmen. Das aktuelle BIM-Modell mit allen relevanten Informationen wird für alle Teilnehmer identisch angezeigt. Auf diese Weise erhalten die

involvierten Akteure der Besprechung Zugang zu allen geometrischen und semantischen Informationen und können sich über relevante Themen (z.B. Mängel, Ausstattungen, etc.) diskutieren. Ferner ist es möglich, direkt am digitalen Modell in der XR-Umgebung Annotationen im „BIM Collaboration Format (BCF)“ zu erstellen. Diese Annotationen werden dann ebenfalls in Echtzeit als BCF-Ausgabe über die bidirektionale Datenschnittstelle an das CDE übertragen. Tabelle 1 zeigt eine grundsätzliche Möglichkeit der involvierten Akteure einer immersiven Besprechung mit unterschiedlichen Ausgabegeräten und Realitäten. Die Anzahl der teilnehmenden Personen ist dabei nicht beschränkt und wird je nach Bedarf individuell festgelegt.

Tabelle 1 Teilnehmende an der immersiven Besprechung

Teilnehmende Person	Beschreibung
<p>Bauüberwachung</p>  <p>Direkt auf der Baustelle / im Gebäude mit einer AR-Brille Erweiterte Realität</p>	<p>Der Bauüberwacher verwendet ein AR-Ausgabegerät und befindet sich direkt auf der Baustelle oder im Gebäude. Dabei kann die Person das BIM-Modell direkt in die Realität einblenden. Dabei können beispielsweise Mängel o. Fehler identifiziert oder Ausführungsvarianten diskutiert werden.</p> <p>In diesem Zusammenhang steht der Ingenieur in einer Interaktion mit dem digitalen Bauwerksmodell. Er kann zum einen Informationen aus dem Modell o. der CDE direkt vor Ort abrufen. Zum anderen können auch Annotationen direkt vor Ort ausgeführt und in Echtzeit integriert werden.</p>
<p>Bauherr</p>  <p>Fernzugriff über einen Desktopcomputer im Büro</p>	<p>Der Bauherr - ggf. unter Beteiligung eines erweiterten Teams von Experten aus verschiedenen Fachbereichen - verfolgt die Baubesprechung live von seinem Desktoprechner am Arbeitsplatz aus. So kann er sich über den aktuellen Baufortschritt oder den Zustand des Bauwerkes informieren. Dabei können Entscheidungen direkt getroffen und bei kritischen Situationen sofort reagiert und eingegriffen werden.</p>
<p>Ingenieurbüro</p>  <p>Beitragung mit einer VR-Brille in der virtuellen Umgebung im Büro</p>	<p>Von einem dritten Standort aus, z.B. einem planenden Architektur- o Ingenieurbüro, verfolgt ein weiterer Fachingenieur ebenfalls die Baubesprechung. Dieser nutzt die VR-Technologie und befindet sich währenddessen in der virtuellen Umgebung unter Verwendung des BIM-Modells. Mit der VR-Brille können die Annotation inkl. realen Bildes nachvollzogen werden. So kann die beteiligte Person direkt bei der</p>

Entscheidungsfindung unterstützen. Bei Bedarf kann sie in Echtzeit Fragen an die Bauüberwachung sowie an andere Kollegen vor Ort stellen. Gleichzeitig kann die Person weitere Annotationen dem Modell hinzufügen, die alle Personen transparent und in Echtzeit abrufen können.

4 Implementierung

Die grundsätzliche Machbarkeit der immersiven Besprechung wird durch die Implementierung eines PoC veranschaulicht. Sie wird direkt an einem Demonstrator, einem Büro eines Gebäudes durchgeführt (s. Bild 3). Zu diesem Zweck wurde ein digitales Modell (s. Bild 2) des Raumes erstellt. Im ersten Schritt wird das digitale Modell inklusive Bestandsdaten in einer Common Data Environment (CDE) im offenen Datenaustauschformat IFC gespeichert. Bei der Durchführung der immersiven Besprechung wird das BIM-Modell aus dem CDE in die XR-Umgebung übertragen. Die XR-Umgebung basiert auf einer Game-Engine, in diesem Fall Unity. Bei der Transformation wird das IFC-Datenformat in ein OBJ-Datenformat unter Verwendung eines Meshing-Algorithmus umgewandelt. Der Meshing-Algorithmus erzeugt aus dem digitalen Raummodell eine zusätzliche "Mesh-Ebene". Das digitale Modell im OBJ-Format dient als Interaktionsschicht in der AR-Umgebung auf dem realen Objekt. Die Interaktion in der VR-Umgebung und der webbasierten Plattform basiert auf dem digitalen Gebäudemodell im IFC-Format. Vor der eigentlichen Durchführung der immersiven Besprechung erfolgt ein Abgleich zwischen dem digitalen Modell und dem realen Objekt. Dazu dienen aufgedruckte QR-Codes als Ankerpunkte für die Synchronisation des realen und virtuellen Koordinatensystems.

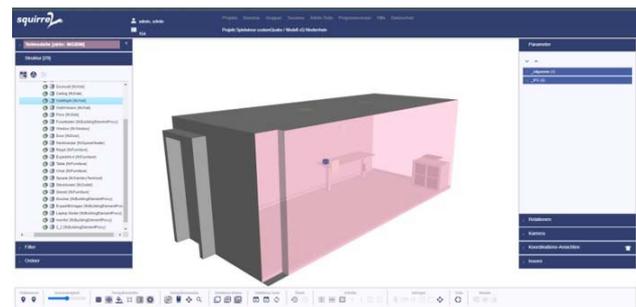


Bild 2 Digitales Modell in der Common Data Environment

Zu Beginn der Erprobung wurden die QR-Codes im Raum mit der AR-Brille (Microsoft HoloLens 2) gescannt. Im gleichen Zuge wurde der "World Locking Algorithmus" [33] ausgeführt, umso das digitale Modell in der XR-Umgebung an der realen Umgebung auszurichten. Dadurch wird die Kohärenz der realen Welt mit der virtuellen Umgebung erzeugt. Zusätzlich erfolgt die Überlagerung des realen Koordinatensystems mit dem digitalen Koordinatensystem. Resultierend daraus entsteht eine exakte Überlappung zwischen des realen Raums und dem digitalen Abbild. Dies garantiert eine geringe Abweichungstoleranzen

bei der Interaktion mit dem Modell. Bei der Implementierung wurde eine Abweichung von 3,00 cm zwischen dem realen Objekt und dem digitalen Modell festgestellt.



Bild 3 Implementierung des Demonstrators per AR

Für den PoC werden insgesamt drei Nutzer an der immersiven Besprechung teilnehmen. Im Konzept kann die Anzahl der Teilnehmenden im Netzwerk nach Bedarf beliebig erweitert werden (s. Tabelle 1). Ein AR-Client, der sich direkt vor Ort im Büro befindet, und die Besprechung leitet. Zudem nehmen zwei Nutzer, die sich jeweils in einer VR-Umgebung und einer webbasierten Plattform befinden, teilzunehmen. Alle Nutzer erhalten über einen VPN-Client individuellen Zugriff auf die Plattform. Für die Durchführung einer immersiven Besprechung ist eine Mobilfunkverbindung vor Ort unerlässlich. Bei der Validierung ist das vorhandene LTE-Netz des Mobilfunkbetreibers ausreichend. Jeder Teilnehmer des Meetings erhält seinen eigenen Avatar. Der AR-Client wird als Avatar mit seiner genauen Position auf dem digitalen Modell auf der XR-Umgebung dargestellt (siehe Bild 4).



Bild 4 XR-Umgebung mit einem Avatar

Die beiden anderen Clients (VR und Desktop) werden in der erweiterten Realität mit ihrem genauen Blickwinkel als Symbole angezeigt. So kennen alle Teilnehmer die genauen Positionen sowie den Blickwinkel der Anderen. Dies gewährleistet eine transparente Zusammenarbeit. Alle Teilnehmer, insgesamt drei Personen, konnten erfolgreich an der Besprechung teilnehmen und über Gesten und Sprache im Modell kommunizieren. Zudem konnten vorhandene Informationen direkt aus der CDE in die XR-Umgebung angezeigt werden (s. Bild 5). In diesem ersten Prototyp ist die Rückführung einer Annotation aus der XR-Umgebung in die CDE unter Nutzung eines BCF-Datenpunktes im bidirektionalen Datenaustausch noch nicht möglich. Ziel war es, die grundsätzliche Machbarkeit eines immersiven Meetings auf Basis eines digitalen BIM-Modells im Hochbau zu demonstrieren.



Bild 5 Darstellung semantischer Informationen in der XR-Umgebung

5 Diskussion

Der Artikel stellt den Ansatz einer immersiven Baubesprechung unter Verwendung digitaler BIM-Modelle im Hochbau vor. Durch die Umsetzung des Konzepts als PoC an einem realen Demonstrator wurde die grundsätzliche Machbarkeit gezeigt. Über einen sicheren VPN-Zugang können alle Akteure über verschiedene Endgeräte an dem immersiven Meeting teilnehmen und interagieren. Darüber hinaus wurde das digitale Modell mit dem realen Modell mit einer minimalen Abweichung von 3 cm synchronisiert. Zugleich können alle relevanten semantischen Attribute des Bauwerks in allen beiden Umgebungen problemlos angezeigt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Nutzenden direkt mit dem Modell in eine Interaktion zu treten und notwendige Annotationen direkt während der Besprechung über BCF-Topics direkt zu erstellen und im Modell exakt zu verorten. Des Weiteren konnte eine performante Schnittstelle zwischen den beiden zum Einsatz kommenden Plattformen (CDE und XR-Umgebung). Gleichzeitig fördert diese Schnittstelle auch die Interoperabilität des Ansatzes, durch die Verwendung von offenen Datenaustauschformaten, wie beispielsweise IFC, BCF und OBJ. Durch den zukünftigen Einsatz der immersiven Besprechung können alle relevanten Prozesse, Besprechungen und Inspektionen im Lebenszyklus eines Bauwerks ortsunabhängig durchgeführt werden. So können bei akuten Problemen jederzeit Experten über die immersive Besprechung hinzugezogen werden. Außerdem stärkt diese neue Art der Kollaboration die Zusammenarbeit aller Beteiligten. Ferner wird der Gedanke einer Single Source of Truth und der openBIM-Ansatz durch die bidirektionale Schnittstelle mit einem Echtzeit-Datenaustausch zwischen der XR-Umgebung und einem CDE sowie die Verwendung offener Datenformate gestärkt. Obendrein wird die Etablierung eines digitalen Zwillings gefördert, da durch den immersiven Ansatz die reale und die digitale Welt stärker miteinander verschmelzen.

Neben den positiven Aspekten des umgesetzten Konzepts weist der Ansatz auch Einschränkungen auf. Eine Einschränkung des Ansatzes ist die bestehende Abweichung zwischen dem realen Objekt und dem digitalen Modell. Obwohl die Abweichung bei etwa drei bis vier Zentimetern liegt, weisen die gedruckten QR-Codes als Referenzpunkte eine hohe Fehlerquote auf. Dies kann durch den Einsatz

von innerräumliche Navigation zur genauen georeferenzierten Synchronisation optimiert werden. Eine weitere Einschränkung ist die Notwendigkeit eines intakten und performanten Datennetzes innerhalb und außerhalb des Gebäudes zur qualitativen Durchführung. Dies kann zu Problemen führen, wenn sich die Baustelle oder das Gebäude in ländlichen Gebieten befindet. Zudem können Empfangsprobleme in Innenräumen auftreten. Darüber hinaus gibt es Einschränkungen hinsichtlich der Robustheit des Systems. Im Moment ist dieser Ansatz noch eine spezifische "Einzellösung" ohne volle Praxistauglichkeit für die spezifischen Prozesse in der Planung, Ausführung und dem Betrieb von Gebäuden. In dem Artikel wurde der erste Ansatz vorgestellt und im begrenzten Umfang die grundsätzliche Machbarkeit anhand eines Fallbeispiels präsentiert.

Weitere Forschungsbedarfe leiten sich aus den bestehenden Einschränkungen ab. In Zukunft soll die Realität über genaue innerräumliche Navigation mit der virtuellen Umgebung synchronisiert werden. Außerdem wird die Systemarchitektur weiterentwickelt, um die Robustheit zu erhöhen. Auch die Schnittstelle für den bidirektionalen Datenaustausch in Echtzeit mit einem CDE wird weiterentwickelt. Ein weiterer wichtiger Punkt in den weiteren Forschungsaktivitäten ist die Darstellung, Verarbeitung und Modifikation von semantischen Informationen des digitalen Modells direkt auf der XR-Umgebung. Zur Sicherstellung der qualitativen Praxistauglichkeit werden für die Optimierungszyklen weitere Validierungen an realen Demonstratoren durchgeführt und Expertenmeinungen eingeholt. Außerdem kann der Ansatz einer immersiven Besprechung auch auf andere Bauwerksstrukturen, wie z.B. Brücken, Tunnel, Anlagen übertragen werden.

6 Fazit und Ausblick

Der wissenschaftliche Artikel stellt das Konzept einer ortsunabhängigen Besprechung im Lebenszyklus von Gebäuden vor. Die theoretischen Grundlagen werden beschrieben und in einem Systemmodell dargestellt. Folgend wird der Ansatz an einem realen Demonstrator implementiert, um die Machbarkeit und erste Validierung aufzuzeigen. Anschließend erfolgt die Diskussion der erzielten Ergebnisse. Weiterführend werden die identifizierten Mehrwerte sowie Grenzen aufgezeigt.

Der neue Ansatz der immersiven Baubesprechung mit digitalen Modellen und XR-Technologien fördert die weitere Digitalisierung der Baubranche und unterstützt die weitere flächendeckende Umsetzung der BIM-Methode. Darüber hinaus wird die Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten in allen Phasen des Lebenszyklus gestärkt. Auch das Zusammenspiel von Mensch und Technik wird optimiert. Resultierend führt dies zu einer erhöhten Prozessqualität und -effizienz in den einzelnen Lebenszyklusphasen - Planung, Bauausführung sowie Betrieb – eines Gebäudes.

Widmung

Diese Forschung wird vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung des Bundesministerium für Wohnen,

Stadtentwicklung und Bauwesen im Förderprogramm ZukunftBau (Projekt: BIMLoVe; Projektnummer: 10.08.18.7-21.42) gefördert

Des Weiteren wird das Vorhaben vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) im Rahmen des Förderprogramms mFUND im Projekt mdFBIM+ (FKZ: 19FS2021A) unterstützt.

Literatur

- [1] S. Kortekamp, S. Werning, O. Thomas und I. Ickerott, „The future of digital work - Use cases for augmented reality“ in *Proceedings of the 27th European Conference on Information Systems (ECIS, Stockholm: Association for Information Systems, 2019.*
- [2] B. Han und F. Leite, „Generic extended reality and integrated development for visualization applications in architecture, engineering, and construction“, *Automation in Construction*, Jg. 140, S. 104329, 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104329.
- [3] C. Liu, S. Cao, W. Tse und X. Xu, „Augmented Reality-assisted Intelligent Window for Cyber-Physical Machine Tools“, *Journal of Manufacturing Systems*, Jg. 44, S. 280–286, 2017, doi: 10.1016/j.jmsy.2017.04.008.
- [4] S. R. Sorko und M. Brunnhofer, „Potentials of Augmented Reality in Training“, *Procedia Manufacturing*, Jg. 31, S. 85–90, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.03.014.
- [5] D. Segovia, M. Mendoza, E. Mendoza und E. González, „Augmented Reality as a Tool for Production and Quality Monitoring“, *Procedia Computer Science*, Jg. 75, S. 291–300, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.12.250.
- [6] F. de Pace, F. Manuri und A. Sanna, „Augmented Reality in Industry 4.0“, *Am J Compt Sci Inform Technol*, Jg. 06, Nr. 01, 2018, doi: 10.21767/2349-3917.100017.
- [7] P. Diegmann, M. Schmidt-Kraepelin, S. Eynden und D. Basten, „Benefits of Augmented Reality in Educational Environments - A Systematic Literature Review“, *Wirtschaftsinformatik Proceedings 2015*, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://aisel.aisnet.org/wi2015/103>
- [8] C. Ziker, B. Truman und H. Dodds, „Cross Reality (XR): Challenges and Opportunities Across the Spectrum“ in *Innovative Learning Environments in STEM Higher Education*, J. Ryoo und K. Winkelmann, Hg., Cham: Springer Nature, 2021, S. 55–77, doi: 10.1007/978-3-030-58948-6_4.
- [9] H.-K. Wu, S. W.-Y. Lee, H.-Y. Chang und J.-C. Liang, „Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education“, *Computers & Education*, Jg. 62, S. 41–49, 2013, doi: 10.1016/j.compedu.2012.10.024.
- [10] J. Carmigniani, B. Furht, M. Anisetti, P. Ceravolo, E. Damiani und M. Ivkovic, „Augmented reality technologies, systems and applications“, *Multimed Tools Appl*, Jg. 51, Nr. 1, S. 341–377, 2011, doi: 10.1007/s11042-010-0660-6.
- [11] A. Caputo, S. Jacota, S. Krayevskyy, M. Pesavento, F. Pellacini und A. Giachetti, „XR-Cockpit: a comparison of VR and AR solutions on an interactive training station“ in *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Vienna, Austria, 2020, S. 603–610, doi: 10.1109/ETFA46521.2020.9212043.
- [12] J. Ryoo und K. Winkelmann, Hg., *Innovative Learning Environments in STEM Higher Education*. Cham: Springer Nature, 2021.

- [13] T. Zhan, K. Yin, J. Xiong, Z. He und S.-T. Wu, „Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Perspectives and Challenges“ (eng), *iScience*, Jg. 23, Nr. 8, S. 101397, 2020, doi: 10.1016/j.isci.2020.101397.
- [14] M. K. Bekele und E. Champion, „A Comparison of Immersive Realities and Interaction Methods: Cultural Learning in Virtual Heritage“ (eng), *Frontiers in robotics and AI*, Jg. 6, S. 91, 2019, doi: 10.3389/frobt.2019.00091.
- [15] D. Puljiz, E. Stohr, K. S. Riesterer, B. Hein und T. Kroger, „General Hand Guidance Framework using Microsoft HoloLens“ in *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Macau, China, 2019, S. 5185–5190, doi: 10.1109/IROS40897.2019.8967649.
- [16] P. Schutt, M. Schwarz und S. Behnke, „Semantic Interaction in Augmented Reality Environments for Microsoft HoloLens“ in *2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, Prague, Czech Republic, 2019, S. 1–6, doi: 10.1109/ECMR.2019.8870937.
- [17] P. V. Ramesh et al., „Holographic elysium of a 4D ophthalmic anatomical and pathological metaverse with extended reality/mixed reality“ (eng), *Indian journal of ophthalmology*, Jg. 70, Nr. 8, S. 3116–3121, 2022, doi: 10.4103/ijo.IJO_120_22.
- [18] A. Borrmann, M. König, C. Koch und J. Beetz, *Building Information Modeling*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [19] K. Klemm-Albert und R. Hartung, „Building Information Modeling“ in *Bautabellen für Ingenieure: Mit Berechnungshinweisen und Beispielen*, A. Albert, Hg., 25. Aufl. Köln: Reguvis, 2022, 8.31-8.50.
- [20] J. Krischler und C. Koch, „BIM-Rollen“ in *VDI-Buch, Building Information Modeling*, A. Borrmann, M. König, C. Koch und J. Beetz, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 353–362, doi: 10.1007/978-3-658-33361-4_17.
- [21] M. Deubel, J. Wolber und S. Hagsheno, „Identifikation, Analyse und Kategorisierung von BIM-Anwendungsfällen/Identification, analysis and categorization of BIM use cases“, *Bauingenieur*, Jg. 93, 07-08, S. 295–303, 2018, doi: 10.37544/0005-6650-2018-07-08-61.
- [22] R. Schönbach, K. Klemm-Albert, E. Aßmus und M. Bergmann, „Entwicklung des Masterplan BIM für Bundesbauten/Development of the BIM master plan for Federal Buildings“, *Bauingenieur*, Jg. 96, Nr. 05, S. 173–181, 2021, doi: 10.37544/0005-6650-2021-05-57.
- [23] L. Chen und H. Luo, „A BIM-based construction quality management model and its applications“, *Automation in Construction*, Jg. 46, S. 64–73, 2014, doi: 10.1016/j.autcon.2014.05.009.
- [24] H. Homayouni, G. Neff und C. S. Dossick, „Theoretical Categories of Successful Collaboration and BIM Implementation within the AEC Industry“ in *Construction Research Congress 2010*, Banff, Alberta, Canada, 2010, S. 778–788, doi: 10.1061/41109(373)78.
- [25] M. Oraee, M. R. Hosseini, E. Papadonikolaki, R. Palliyaguru und M. Arashpour, „Collaboration in BIM-based construction networks: A bibliometric-qualitative literature review“, *International Journal of Project Management*, Jg. 35, Nr. 7, S. 1288–1301, 2017, doi: 10.1016/j.ijproman.2017.07.001.
- [26] G. Kostov und J. Wolfartsberger, „Designing a Framework for Collaborative Mixed Reality Training“, *Procedia Computer Science*, Jg. 200, S. 896–903, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.01.287.
- [27] H. Xue, P. Sharma und F. Wild, „User Satisfaction in Augmented Reality-Based Training Using Microsoft HoloLens“, *Computers*, Jg. 8, Nr. 1, S. 9, 2019, doi: 10.3390/computers8010009.
- [28] D. Abdulkarim et al., „A methodological framework to assess the accuracy of virtual reality hand-tracking systems: A case study with the Meta Quest 2“ (eng), *Behavior research methods*, 2023, doi: 10.3758/s13428-022-02051-8.
- [29] A. K. Upadhyay und K. Khandelwal, „Metaverse: the future of immersive training“, *SHR*, Jg. 21, Nr. 3, S. 83–86, 2022, doi: 10.1108/SHR-02-2022-0009.
- [30] H. Dong und Y. Liu, „Metaverse Meets Consumer Electronics“, *IEEE Consumer Electron. Mag.*, S. 1–3, 2022, doi: 10.1109/MCE.2022.3229180.
- [31] C. Theodorou, V. Velisavljevic, V. Dyo und F. Nonyelu, „Visual SLAM algorithms and their application for AR, mapping, localization and wayfinding“, *Array*, Jg. 15, S. 100222, 2022, doi: 10.1016/j.array.2022.100222.
- [32] S. M. U. Arif, M. Carli und F. Battisti, „A study on human reaction time in a mixed reality environment“ in *2021 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, Iasi, Romania, 2021, S. 1–4, doi: 10.1109/ISSCS52333.2021.9497369.
- [33] S. Teruggi und F. Fassi, „MIXED REALITY CONTENT ALIGNMENT IN MONUMENTAL ENVIRONMENTS“, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B2-2022, S. 901–908, 2022, doi: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-901-2022.
- [34] I. Novakova, F. Jakab, M. Michalko und O. Kainz, „Methodical procedure for creating content for interactive augmented reality“ in *2022 20th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*, Stary Smokovec, Slovakia, 2022, S. 466–471, doi: 10.1109/ICETA57911.2022.9974837.
- [35] Microsoft, *WorldLockingTools-Unity*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/microsoft/MixedReality-WorldLockingTools-Unity/releases> (Zugriff am: 27. Februar 2023).
- [36] M. A. Hamilton, A. P. Beug, H. J. Hamilton und W. J. Norton, „Augmented Reality Technology for People Living with Dementia and their Care Partners“ in *ICVARS 2021: 2021 the 5th International Conference on Virtual and Augmented Reality Simulations*, Melbourne VIC Australia, 2021, S. 21–30, doi: 10.1145/3463914.3463918.
- [37] J. Simonen, T. Björk, T. Nikula und K. Ryyänen, „Measuring world-locking accuracy in AR/MR head-mounted displays“ in *Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) II*, Online Only, United States, 28.03.2021 - 01.04.2021, S. 30, doi: 10.1117/12.2584208.
- [38] Y. Lee, B. Yoo und S.-H. Lee, „Sharing Ambient Objects Using Real-time Point Cloud Streaming in Web-based XR Remote Collaboration“ in *Web3D '21: The 26th International Conference on 3D Web Technology*, Pisa Italy, 2021, S. 1–9, doi: 10.1145/3485444.3487642.
- [39] S. Thanyadit, P. Punpongsonon, T. Piumsomboon und T.-C. Pong, „XR-LIVE: Enhancing Asynchronous Shared-Space Demonstrations with Spatial-temporal Assistive Toolsets for Effective Learning in Immersive Virtual Laboratories“, *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, Jg. 6, CSCW1, S. 1–23, 2022, doi: 10.1145/3512983.
- [40] Y. Lee und B. Yoo, „XR collaboration beyond virtual reality: work in the real world“, *Journal of Computational*

- Design and Engineering, Jg. 8, Nr. 2, S. 756–772, 2021, doi: 10.1093/jcde/qwab012.
- [41] D. Mourtzis, V. Siatras, J. Angelopoulos und N. Panopoulos, „An Augmented Reality Collaborative Product Design Cloud-Based Platform in the Context of Learning Factory“, *Procedia Manufacturing*, Jg. 45, S. 546–551, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.04.076.
- [42] S. Rankohi und L. Waugh, „Review and analysis of augmented reality literature for construction industry“, *Vis. in Eng.*, Jg. 1, Nr. 1, 2013, doi: 10.1186/2213-7459-1-9.
- [43] L. S. Kang, H. S. Moon, N. Dawood und M. S. Kang, „Development of methodology and virtual system for optimised simulation of road design data“, *Automation in Construction*, Jg. 19, Nr. 8, S. 1000–1015, 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2010.09.001.
- [44] X. Liang, M. Lu und J.-P. Zhang, „On-site visualization of building component erection enabled by integration of four-dimensional modeling and automated surveying“, *Automation in Construction*, Jg. 20, Nr. 3, S. 236–246, 2011, doi: 10.1016/j.autcon.2010.10.002.
- [45] N. Gu, M. J. Kim und M. L. Maher, „Technological advancements in synchronous collaboration: The effect of 3D virtual worlds and tangible user interfaces on architectural design“, *Automation in Construction*, Jg. 20, Nr. 3, S. 270–278, 2011, doi: 10.1016/j.autcon.2010.10.004.
- [46] A. Hammad, H. Wang und S. Mudu, „Distributed augmented reality for visualizing collaborative construction tasks“, *ASCE Journal of Computing in Civil*, Nr. 23, S. 418–427, 2009.
- [47] A. Behzadan und V. Kamat, „Integrated information modeling and visual simulation of engineering operations using dynamic augmented reality scene graphs.“, *Journal of Information Technology in Construction (ITCon)*, Nr. 16, S. 25–278, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.itcon.org/paper/2011/17>
- [48] A. D. Styliadis, „Historical photography-based computer-aided architectural design: Demolished buildings information modeling with reverse engineering functionality“, *Automation in Construction*, Jg. 18, Nr. 1, S. 51–69, 2008, doi: 10.1016/j.autcon.2008.04.010.
- [49] A. Jardón, J. G. Victores, S. Martínez und C. Balaguer, „Experience acquisition simulator for operating micro-tunneling boring machines“, *Automation in Construction*, Jg. 23, S. 33–46, 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2011.12.002.
- [50] X. Wang, „Augmented Reality in Architecture and Design: Potentials and Challenges for Application“, *International Journal of Architectural Computing*, Jg. 7, Nr. 2, S. 309–326, 2009, doi: 10.1260/147807709788921985.
- [51] Y. Li und C. Liu, „Integrating field data and 3D simulation for tower crane activity monitoring and alarming“, *Automation in Construction*, Jg. 27, S. 111–119, 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2012.05.003.
- [52] Z. Zhu und I. Brilakis, „Parameter optimization for automated concrete detection in image data.“, *Journal of Automation in Construction*, Nr. 19, S. 944–953, 2010.
- [53] M. Golparvar-Fard, J. Bohn, J. Teizer, S. Savarese und F. Peña-Mora, „Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques“, *Automation in Construction*, Jg. 20, Nr. 8, S. 1143–1155, 2011, doi: 10.1016/j.autcon.2011.04.016.
- [54] D. H. Shin und P. S. Dunston, „Technology development needs for advancing Augmented Reality-based inspection“, *Automation in Construction*, Jg. 19, Nr. 2, S. 169–182, 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2009.11.001.
- [55] Z. Zhu, S. German und I. Brilakis, „Visual retrieval of concrete crack properties for automated post-earthquake structural safety evaluation“, *Automation in Construction*, Jg. 20, Nr. 7, S. 874–883, 2011, doi: 10.1016/j.autcon.2011.03.004.
- [56] L. F. Gül, N. Gu und A. Williams, „Virtual worlds as a constructivist learning platform: evaluations of 3D virtual worlds on design teaching and learning“, *Journal of Information Technology in Construction*, Nr. 13, S. 578–593, 2008.
- [57] U. Isikdag und J. Underwood, „Two design patterns for facilitating Building Information Model-based synchronous collaboration“, *Automation in Construction*, Jg. 19, Nr. 5, S. 544–553, 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2009.11.006.
- [58] M. Golparvar-Fard, F. Peña-Mora und S. Savarese, „Application of D4AR A 4-Dimensional augmented reality model for automating construction progress monitoring data collection, processing and communication“, *Journal of Information Technology in Construction (ITCon)*, Nr. 14, S. 129–153, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.itcon.org/paper/2009/13>
- [59] M. Ghobadi und S. M.E. Sepasgozar, „An Investigation of Virtual Reality Technology Adoption in the Construction Industry“ in *Smart Cities and Construction Technologies*, S. Shirowzhan und K. Zhang, Hg., *IntechOpen*, 2020, doi: 10.5772/intechopen.91351.
- [60] G. Ozcan-Deniz, „Expanding applications of virtual reality in construction industry: A multiple case study approach“, *JCEMI*, Jg. 2, Nr. 2, S. 48–66, 2019, doi: 10.31462/jcemi.2019.02048066.
- [61] C.-L. Ho und R.-J. Dzung, „Construction safety training via e-Learning: Learning effectiveness and user satisfaction“, *Computers & Education*, Jg. 55, Nr. 2, S. 858–867, 2010, doi: 10.1016/j.compedu.2010.03.017.
- [62] R. Sacks, A. Perlman und R. Barak, „Construction safety training using immersive virtual reality“, *Construction Management and Economics*, Jg. 31, Nr. 9, S. 1005–1017, 2013, doi: 10.1080/01446193.2013.828844.
- [63] D. Zhao und J. Lucas, „Virtual reality simulation for construction safety promotion“ (eng), *International journal of injury control and safety promotion*, Jg. 22, Nr. 1, S. 57–67, 2015, doi: 10.1080/17457300.2013.861853.
- [64] S. Ahmed, „A Review on Using Opportunities of Augmented Reality and Virtual Reality in Construction Project Management“, *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*, Jg. 11, Nr. 1, S. 1839–1852, 2019.
- [65] F. N. Catbas et al., „Extended Reality (XR) for Condition Assessment of Civil Engineering Structures: A Literature Review“ (eng), *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 22, Nr. 23, 2022, doi: 10.3390/s22239560.
- [66] M. Al-Adhami, S. Wu und M. Ling, „Extended Reality Approach for Construction Quality Control“ in *CIB World Building Congress*, Hong Kong, 2019.
- [67] D. Salinas, F. Muñoz-La Rivera und J. Mora-Serrano, „Critical Analysis of the Evaluation Methods of Extended Reality (XR) Experiences for Construction Safety“ (eng), *International journal of environmental research and public health*, Jg. 19, Nr. 22, 2022, doi: 10.3390/ijerph192215272.
- [68] S. Alizadehsalehi und I. Yitmen, „Digital twin-based progress monitoring management model through reality capture to extended reality technologies (DRX)“, *SASBE*, Jg. 12, Nr. 1, S. 200–236, 2023, doi: 10.1108/SASBE-01-2021-0016.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
D U I S B U R G
E S S E N

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/79108

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20231017-135844-2

In: Tagungsband zum 32. BBB-Assistent:innentreffen 2023: 04.10.2023 - 06.10.2023, UniversitätDuisburg-Essen.



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell 4.0 Lizenz (CC BY-NC 4.0) genutzt werden.