

Mixed Reality Anwendungen und ihr Einsatz in der Aus- und Weiterbildung kapitalintensiver Industrien

J. Teizer, M. Wolf, M. König

1 Einleitung

Kapitalintensive Industrien wie die Bauindustrie nutzen oftmals komplexe Anlagen oder Infrastruktur bei denen die Vermittlung von technischem Wissen und Regeln zu korrekten Arbeitsprozessen eine entscheidende Rolle spielen. Das geforderte Wissen in den Arbeitsprozessen der Planungs-, Bauausführung-, und Wartungsphasen verständlich und praktisch in der Ausbildung zu vermitteln, zu vertiefen und zu festigen, ist eine große Herausforderung für die zentralen und internen Ausbildungszentren von Organisationen und Unternehmungen. Oft erfolgt die praktische Vermittlung anhand von speziell aufgebauten realitätsnahen Arbeitsmitteln, Maschinen, technischen Anlagen und Umgebungen. Dort jedoch können bestimmte Arbeitssituationen nur schwer praxisnah nachgestellt werden, da die Arbeitsmittel sowohl in der Anschaffung als auch in der Unterhaltung zu teuer sind. Um beispielsweise Schäden an komplexen Systemen im Anlagenbau zu vermeiden, werden die Auszubildenden oftmals nur theoretisch über die Folgen einer Fehlbedienung aufgeklärt. Auch das Erkennen von Gefahrensituationen ist nur eingeschränkt möglich, ohne die Lernenden oder Lehrenden einer wirklichen Gefahrenquelle auszusetzen.

Daher werden im Rahmen dieses Artikels zuerst die Grundprinzipien von Mixed Reality erläutert. Ein Vergleich bestehender Lernverfahren wird kritisch hinterfragt bezüglich des Einsatzes moderner Technologien. Des Weiteren werden im Artikel authentische Lernsituationen mithilfe von Ansätzen des situierten Lernens unter Verwendung von Mixed-Reality-Umgebungen dargestellt und ihr potenzieller Erfolg anhand realistischer Anwendungen erprobt. Aufgrund des hohen Maßes an Authentizität, des Immersion-

scharakters und der Möglichkeit, aus der Ich-Perspektive zu handeln, erlaubt Mixed Reality bestimmte Arbeitsschritte eigenständig zu üben, indem für eine Problemsituation notwendige Informationen beschafft, die Handlungen geplant und durch die (haptische) Manipulation von Objekten geführt werden. Des Weiteren können Handlungsabläufe so häufig und im eigenen Lerntempo ausgeführt werden bis ein bestimmter Handlungsablauf sicher ausgeführt werden kann. Dadurch wird dem Phänomen des sogenannten „trägen Wissens“ – also dem ausbleibenden Anwenden und Transferieren von Gelerntem in den späteren Berufsalltag – vorgebeugt.

2 Ausgangs- und Bedarfslage

Tausende Auszubildende von Baufirmen (in der Regel von kleinen und mittleren Unternehmen, KMU) beginnen jährlich eine mehrjährige Ausbildung in einem der angebotenen Bauberufe. Neben der Unterweisung in den Tätigkeiten im Umgang mit Baumaschinen (z.B. Anschlagen von Lasten an Krane), Werkzeugen (z.B. sachgemäßes Nutzen von Handgeräten), temporären Materialien (z.B. Auf- und Abbau von Gerüsten) und Baustoffen (z.B. Deklaration möglicher Gefahren), erfolgen auch Schulungen in den Bereichen des Arbeitsschutzes, insbesondere der Arbeitssicherheit und dem Gesundheitsschutz (z.B. Einhaltung von Gesetzen und Richtlinien).

Zurzeit werden in den Ausbildungsstätten die Lehrmodule hauptsächlich in theoretischer Form anhand von (selbst) erstellten Schulungsunterlagen, gemäß den Ausbildungsrichtlinien geschult. Optional werden auch klassischer Frontalunterricht und Selbststudium kombiniert. Als Lernunterlagen stehen Bücher, digitale Dokumente und einfache 2D-Animationen zur Verfügung. Wegen des erheblichen finanziellen Aufwandes und des wenigen Lehrpersonals erfolgen in vielen Lehrmodulen nur selten Praxis-schulungen. Die praktische Ausbildung erfolgt an speziellen Trainingsanlagen oder unter gesicherter Anleitung in produktiver Umgebung. In der produktiven Umgebung, besonders für den Bau komplexer Anlagen, können nur wenige Arbeitsschritte erprobt werden, da eine Fehlbedienung vermieden werden muss. Konsequenzen einer Fehlbedienung können somit nur unzureichend praktisch vermittelt werden. Die wenigen Trainingsanlagen die in zentralen oder internen Ausbildungsstätten verfügbar sind, ermöglichen auch nur die Erprobung von vorgegebenen Arbeitsschritten und sind mit erheblichen Einrichtungs- und Betriebskosten verbunden.

Besonders die Erfahrungen bezüglich Arbeitsschutz in der Bau- und Chemieindustrie zeigen, dass eine praktische Erprobung im Umfeld von gefährlichen Werkzeugen, Maschinen und Anlagen sehr wichtig ist, um sowohl mögliche Gefahren für Personen als auch kostspielige Schäden durch Fehlbedienungen und Unfälle zu vermeiden. In den Ausbildungsberufen der Bau- und Chemieindustrie übersteigt

Dr.-Ing. Jochen Teizer

Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum
www.inf.bi.rub.de, jochen.teizer@rub.de

Dr.-Ing. Mario Wolf

Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik
Fakultät für Maschinenbau
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum
www.itm.rub.de, mario.wolf@itm.rub.de

Prof. Dr.-Ing. Markus König

Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum
www.inf.bi.rub.de, koenig@inf.bi.rub.de

Reale Umgebung

(1) GUI-Nutzung

(2) Augmented Reality

(3) Augmented Virtuality

(4) Virtual Reality

Virtuelle Umgebung

Bild 1. Mixed Reality Übersicht

dennoch die Anzahl der Auszubildenden die vorhandenen, investitionsintensiven Übungsgeräte um ein Vielfaches. Damit auch in den kostenintensiven Ausbildungsbereichen der Bau- und Chemieindustrie die notwendigen Kompetenzen für die spätere Ausübung der Berufe vermittelt werden können, sind praxisnahe Lehr- und Lernansätze notwendig. In der Bau- als auch in der Chemieindustrie sind kom-

plexe, kapitalintensive und risikoreiche Projekte allgegenwärtig. Nur gut ausgebildeter und qualifizierter Nachwuchs wird den Erhalt und die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Unternehmen in der Bau- und Chemieindustrie gewährleisten können.

Mixed Reality (MR) Anwendungen bieten Lösungen an, um die heutigen Probleme in Bezug auf den Mangel an realitätsnahen Trainingsumgebungen und die Simulation von kritischen Arbeitsaufgaben lösen zu können. MR zielt in Anlehnung auf das konstruktivistische Lernparadigma darauf ab, eine möglichst realitätsnahe aktive Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand zu ermöglichen [1].

Klassische 3D-Anwendungen werden über Interaktion mit realen Elementen (z.B. Touchdisplay) gesteuert. In einer Virtual-Reality (VR)-Umgebung taucht der Nutzer vollständig in die Virtualität ein und steuert virtuelle Elemente über spezielle Controller. Augmented Virtuality (AV) bezeichnet die Art von Anwendungen, bei der reale „Dinge“ in die Virtualität eingebracht werden. Dies kann in Form von Betriebsdaten sein oder durch Einbringung von weiteren haptischen Komponenten bis hin zur Aufnahme von realen Gegenständen über Kameras, die in die virtuelle Umgebung eingefügt werden. Die Bandbreite an Einbindungsmöglichkeiten umfasst dabei reale Interaktion mit virtueller Reaktion, virtuelle Interaktion mit realer Reaktion, sowie die virtuelle Abbildung realer Inhalte.

Wichtig für eine effektive und effiziente Anwendung von MR in der Aus- und Weiterbildung ist die Analyse bestehender Lernprozesse, das genaue Verständnis des Bedarfs einsetzbarer Methoden inklusive technischer Lösungen, die zielgerichtete Entwicklung und die Erfassung des Mehrwerts. Im Folgenden werden die verschiedenen Visualisierungsverfahren erklärt und mögliche Anwendungsszenarien anhand von praktischen Beispielen vorgestellt.

3 Visualisierungen in Mixed Reality

Milgram et al. [2] bezeichnen die Gesamtheit von MR-Ausprägungen als Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum (engl., Reality-Virtuality-Continuum). Das Kontinuum besteht zwischen den Extrema der tatsächlichen Realität als Umgebung und einer vollständig virtuellen Umgebung. Diese Randbereiche zählen jedoch nicht zur MR, da sie keine Mischform darstellen. MR bezeichnet daher eine Menge von Visualisierungsmethoden, die auf unterschiedliche Arten Realität und virtuelle Informationen miteinander verbindet. Die beiden Ausprägungsformen, die die Mischbereiche darstellen, werden als Augmented Reality (AR) und Augmented Virtuality (AV) bezeichnet.

Bild 1 verdeutlicht vor diesem Hintergrund die verschiedenen Ausprägungen der MR. Ausgehend von der tatsächlichen Realität nimmt die Dichte an virtuellen Informationen oder Inhalten Richtung virtueller Realität stetig zu, bis in der virtuellen Realität keine realen Informationen mehr angezeigt/eingefügt werden. Der Begriff der erweiterten Realität (AR) und der erweiterten Virtualität (AV) wird genutzt, um das Einbringen von entweder realen oder virtuellen Informationen in die jeweils entgegengesetzte Darstellung zu bezeichnen. AR wird in diesem Kontext als eine Überlagerung der Realität mit virtuellen Inhalten definiert [3]. Diese virtuellen Inhalte können eine beliebige Form aufweisen, zum Beispiel als Texte, Bilder, Videos bis hin zu komplexen, interaktiven 3D-Modellen.

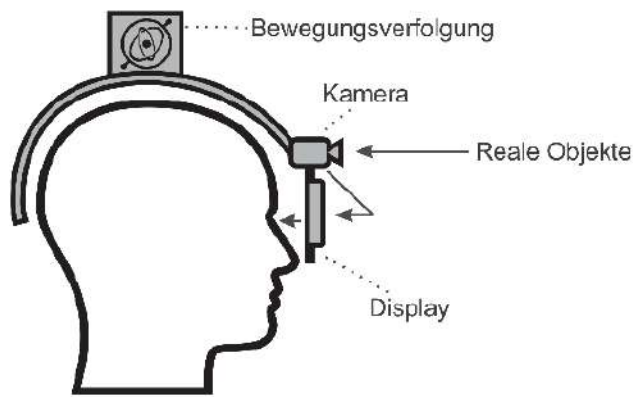


Bild 2. Video-See-Through-Verfahren (VST)

Die Abgrenzung zu AV ist fließend. AV bezeichnet auf der AR-zugewandten Seite das Einbinden von realen Gegenständen in eine virtuelle Umgebung und reduziert sich in Richtung der virtuellen Realität auf die Nutzung von zum Beispiel realen Betriebsdaten für die Animation von virtuellen Modellen.

Für die Nutzung der verschiedenen Ausprägungen der MR gibt es aber dennoch gut unterscheidbare Implementierungsoptionen. Rekimoto et al. [4] haben einige Nutzungsprinzipien aufgestellt, die in Bild 1 erweitert werden. Die typische Nutzung von grafischen Benutzungsoberflächen (GUI, engl. Graphical User Interface, Bild 1, Nr. 1) ist charakterisiert durch die klare Trennung von realer Welt und virtuellen Inhalten auf den Monitoren.

In AR (Bild 1, Nr. 2) kann der Mensch weiterhin in der realen Welt interagieren und diese wahrnehmen, aber auch die virtuellen Inhalte einsehen, welche als Overlay „über“ der Realität eingeblendet werden. Je nach Implementierung sind auch Interaktionen der Umgebung mit der AR-Anwendung möglich. Das heißt, es können Daten aus der Realität einbezogen werden, oder virtuelle Steuerelemente können Einfluss auf reale Systeme nehmen.

In VR (Bild 1, Nr. 4) kann der Benutzer zwar mit den virtuellen Inhalten interagieren, ist aber vollkommen von der realen Umgebung abgeschottet. Darüber hinaus sind auch die virtuellen Inhalte ebenfalls ohne direkten Bezug zur Umgebung.

Auch in AV (Bild 1, Nr. 3) taucht der Nutzer in eine virtuelle Welt ein, die ihn umgibt. Darüber hinaus werden Elemente oder Daten der realen Welt in die Virtualität eingebracht, sowie eingeblendet.

Jede Ausprägungsform der MR hat spezifische Anwendungsfälle, Stärken und Schwächen, die darüber hinaus auch vom Stand der Technik und dem jeweilig genutzten Ausgabegerät abhängen. In diesem Zusammenhang zeigen aktuelle Wirtschaftszahlen, dass die VR-Technologie bereits im Konsumentenmarkt angekommen ist, während AR weitestgehend als noch in der Entwicklungsphase wahrgenommen wird [5].

3.1 Augmented Reality (AR)

Im Bereich der AR gilt nach wie vor die Definition nach [3], nach der man unter AR die Kombination von Realität und Virtualität durch Überlagerung versteht, deren Darstellung in Echtzeit erfolgt, interaktiv ist und in der 3D-Objekte genutzt werden können. Dabei kann die Darstellung einer solchen erweiterten Realität in die fünf Schritte Videoauf-

nahme, Tracking, Registrierung, Darstellung und Ausgabe unterteilt werden, wobei diese Verarbeitungsschritte pro Kamera-Einzelbild ausgeführt werden.

Die Videoaufnahme geschieht zunächst durch eine beliebige, in ihren Parametern bekannte Kamera (Webcam, Camcorder, Smart Device Kamera etc.). Das Tracking (dt. Verfolgung) bezeichnet dabei die Berechnung der Position und Lage/Orientierung des Blickfelds der vorher genutzten Kamera. Je nach Ausprägung der AR weicht dieses Blickfeld von dem des AR-Benutzers ab. Die Lage kann über Inertialsensorik, Gyrosensoren und Magnetometer ausreichend genau erfasst werden. Für die Erfassung der Position muss zwischen Innen- und Außenbereichen und der erforderlichen Genauigkeit unterschieden werden. Für geringe Genauigkeitsanforderungen im Außenbereich können GNSS (engl. Global Navigation Satellite System, u.a. GPS, GLO-NASS, Galileo oder BeiDou) genutzt werden.

Für Einsätze im Innenraum und (potenziell) höhere Genauigkeit werden Computervision-Ansätze genutzt. Sie erlauben neben der Positionserfassung auch die Lage gegenüber einer Referenz (z. B. markiert in einem Bauwerksinformationsmodell, kurz BIM) [6]. Durch die hohe Leistungsfähigkeit und die ohnehin verfügbare Kamera von Smart Devices sind solche Anwendungen besonders für mobile Applikationen geeignet [7], [8]. Für das Tracking werden im Bereich der AR besonders die zwei am meisten verbreiteten Verfahren des kamerabasierten Trackings mit Markern und des merkmalsbasierten Trackings unterschieden [7], [9].

Als Marker können in modernen Frameworks auch Barcodes, Quick Response (QR)-Codes oder proprietäre Markerstandards wie PTC's VuMark genutzt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit ein beliebiges Bild als Marker zu nutzen, wenn dieses vorverarbeitet wurde.

Unter Registrierung versteht man darüber hinaus die Verankerung der digitalen Daten in der realen Welt. Der einfachste Fall ist hier die Registrierung eines 3D-Objekts im Ursprung des Koordinatensystems eines Trackingmarkers. Die Punkte Darstellung und Ausgabe sind abhängig von der technischen Umsetzung sowie dem Ausgabegerät. Dabei werden besonders drei Verfahren für die Darstellung von AR unterschieden.

- Video-See-Through (VST): Beim VST-Verfahren werden die genannten Schritte ausgeführt, sodass sowohl das Kamerabild selbst, als auch die Darstellung der 3D-Inhalte verrechnet werden müssen, bevor die Ausgabe erfolgt [9]. Der Aufbau für das VST-Verfahren in HMD (Head-Mounted Display/Device) ist in Bild 2 dargestellt. Der Nutzer des HMD blickt dabei auf ein Display, welches kurz vor den Augen angebracht ist. Häufig werden zum Ausgleich des sehr kurzen Augenabstands Fresnel-Linsen genutzt, um Irritation zu verhindern [9]. Da der Nutzer über das Display sowohl die Umgebung als auch das digitale Overlay wahrnimmt, kommt es bei einem Systemausfall zum „Blackout“. Der Nutzer muss erst das HMD abnehmen, um die Realität mit den eigenen Augen wahrnehmen zu können. Eindeutiger Vorteil des Systems ist die bessere Qualität der Überlagerung, da die Abschattung des Overlays nur von der Verrechnung mit dem Kamerabild und nicht von einem optischen Element oder der Umgebung abhängt [7].
- Handheld Augmented Reality: Das gleiche Prinzip wird bei Handheld AR angewandt, wenn Smart Devi-

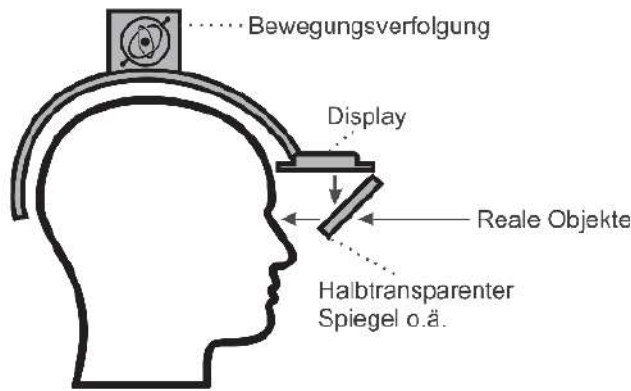


Bild 3. Optical-See-Through-Verfahren (OST)

ces für die Darstellung von AR-Inhalten genutzt werden, wobei alle wesentlichen Elemente durch die Sensorik des Smart Devices abgedeckt werden. Die Nachteile des „Blackouts“ entfallen durch den normalen Arbeitsabstand zum Smart Device, allerdings muss dieses in der Hand gehalten werden und schränkt so die Arbeitsfähigkeit von Technikern ein [10]. Einige Vorteile von Smart Devices sind allerdings die Leistungsfähigkeit, Konnektivität, geringen Kosten und Verwendbarkeit als generelles Arbeitswerkzeug.

- Optical-See-Through (OST): Beim OST-Verfahren werden die vorher genannten Schritte Videoaufnahme, Tracking und Registrierung ausgeführt und dann eine auf der Kamerapose basierende Perspektivenkorrektur der 3D-Inhalte berechnet [9]. Bild 3 zeigt den grundsätzlichen Aufbau für das typischerweise als HMD ausgelegte OST-Verfahren. Durch die Verwendung von zum Beispiel halbdurchsichtigen Spiegeln kann der Benutzer die Umgebung, auch bei einem Systemausfall, ungehindert wahrnehmen. Es wird nur der vorher perspektivisch korrigierte 3D-Inhalt auf dem Display ausgegeben und durch die Reflexion mit der Realität „gemischt“. Bedingt durch die Anbringung des Spiegels kurz vor den Augen entsteht allerdings ein Fokusunterschied im Sichtfeld des Betrachters, der irritierend wirken kann [10]. Bei den am Markt verfügbaren AR-Brillen variiert das überlagerbare Sichtfeld sehr stark, weshalb es auch bei hochpreisigen Geräten der letzten Generation (Microsoft HoloLens: 30°-Blickwinkel) zu „Abschneide“-Effekten kommen kann, bei denen das Overlay deutlich vor dem natürlichen Sichtfeld endet, wie in [7] erläutert wird. Aktuelle Modelle erreichen höhere Bildwinkel, wie die Meta 2 von Metavision mit 90°. Ein Problem an der Nutzung von halbdurchsichtigen Spiegeln ist allerdings die Darstellung in hellen Umgebungen, die das Overlay überblenden können. Azuma benennt als Herausforderung für die technische Entwicklung der kommenden HMD-Generation daher die lokale Abschattung der Spiegel, um diesem Effekt entgegenzuwirken [11].

3.2 Augmented Virtuality (AV)

Um eine Visualisierung in AV durchführen zu können, wird grundsätzlich VR-Hardware genutzt und um Eingabedaten erweitert. Als Mischform (VR + Elemente der Realität) gibt es verschiedene Ausprägungen, etwa die Einbringung von

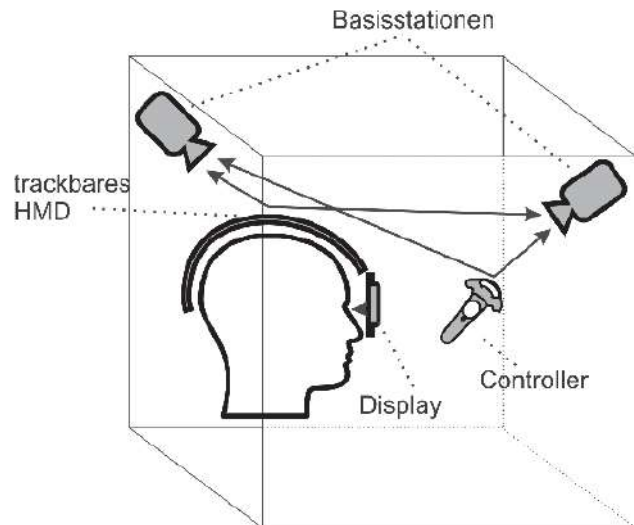


Bild 4. Outside-In-Tracking

realen Daten, Bildern, bis hin zu Videostreams. Kommerzielle Lösungen beschränken sich in aller Regel auf Eingabegeräte, die reale Gegenstände nachbilden, wie Sportgeräte, Musikinstrumente, Waffen etc. Für die Erfassung der Handpositionen des Nutzers kann ebenfalls spezielle Sensorik genutzt werden, die entweder im HMD fest verbaut ist, oder nachrüstbar ist wie zum Beispiel der Leap Motion Controller. Die aktuelle Marktverteilung zeigt einen großen Vorsprung der Outside-In-Tracking-Produkte mit einem Marktanteil von 86 Prozent, während alternative, oft Smart Device basierte Inside-Out-Ansätze, nur 14 Prozent aufweisen [5].

3.3 Virtual Reality (VR)

Für die Visualisierung mit VR stehen verschiedene Technologien zur Verfügung, die seit den 1990er-Jahren stets weiterentwickelt wurden [3], [12]. Cave Automatic Virtual Environment (CAVE) ist eine der frühesten Umsetzungen von VR. Als CAVE wird ein Raum bezeichnet, in dem sich ein oder mehrere Menschen frei bewegen können. Projektoren projizieren ein Bild aus der jeweiligen Perspektive auf die umgebenden Leinwände. Eine Powerwall entspricht einer einzelnen Wand einer Cave, häufig ausgeführt als stereoskopische 3D-Darstellung. Üblicherweise wird ein Outside-In-Tracking durchgeführt, bei dem im Raum angebrachte Infrarotsensoren die Bewegungen von Kopfpose und Controllern verfolgen, um die Perspektive anzupassen (Bild 4). Als Head-Mounted-Displays (HMD) werden im Allgemeinen alle Formen von VR-Brillen bezeichnet, wobei die Abkürzung als HMD auch im Bereich der AR genutzt wird. Häufig werden diese Brillen nicht autonom betrieben, sondern werden kabelgebunden oder kabellos von einem PC (oder vergleichbarem Gerät) mit Daten versorgt. Sowohl die Outside-In-Tracking-Methode, welche schon bei CAVE-Systemen Anwendung fand, als auch die Inside-Out-Tracking-Methode werden bei VR-HMDs genutzt.

Beim Outside-In-Tracking werden Basisstationen genutzt, die die Position des Headsets und der Controller aufnehmen und an den PC übertragen. Aus den resultierenden Positionen ergeben sich Perspektiven- und Positionsänderungen im Bild, welches im HMD dargestellt wird. Ein möglicher Vorteil besteht in der blickwinkelunabhängigen Tra-

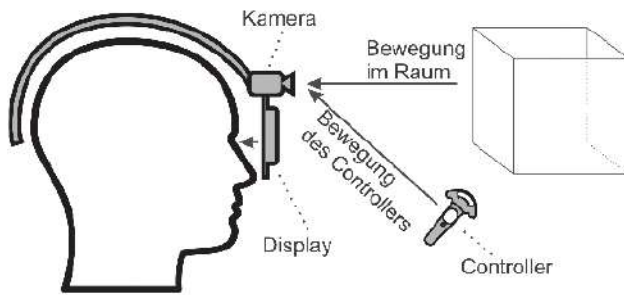


Bild 5. Inside-Out-Tracking

ckingfähigkeit von Controllern und sonstigen Geräten, da die Basisstationen fest installiert sind und einen Bereich zwischen 25 m² und 100 m² im Consumerbereich abdecken. Bei Inside-Out-Tracking werden keine Basisstationen benötigt, da ein permanentes SLAM Tracking (engl. Simultaneous Location and Mapping) durch ein Kamerasystem am HMD ausgeführt wird, welches auch die Pose der Controller aufnimmt. Ein Vorteil ist hier das schnelle Setup ohne Montage und Kalibrierung von Basisstationen, wobei die Eingabegeräte nur im Sichtfeld des Kamerasystems getrackt werden können (Bild 5).

4 Erstellen eines digitalen Lernmoduls (Trainingsszenario)

Nachdem der vorangegangene Abschnitt die grundlegenden Visualisierungen der MR beschrieben hat, folgt nun eine Beschreibung der Autorenwerkzeuge und Sensortechnologien die zur Entwicklung von Inhalten und Informationen wichtig sind.

In Zeiten von Social Media und individualisierbaren Lernumgebungen wirken statische Lerninhalte nicht mehr ausreichend. Auch Lehrende haben häufig den Anspruch, die von ihnen verwendeten Lehr- und Lernmaterialien zu verändern, anzupassen und weiterzuentwickeln und somit ihren Unterricht individuell besser zugänglich zu gestalten. Sehr verschieden sind auch die Anforderungen und örtlichen Gegebenheiten in den zentralen oder internen Ausbildungsstätten der Bauindustrie.

Die zentrale Aufgabe von Autorenwerkzeugen besteht daher darin, verschiedene Informationsprodukte für verschiedene Zielgruppen (z.B. Anwender, Administratoren, Entwickler) im gewünschten Ausgabeformat zur Verfügung zu stellen. Damit können Ausbilder (mit der notwendigen Medienkompetenz) ihre eigenen Inhalte maßgeschneidert erstellen und Statusinformationen jederzeit abrufen.

Übergeordnete Ziele zur Erstellung eines digitalen Trainingsszenarios sind:

- Direkte Eingabe-Methoden und damit verbundene realitätsnahe Interaktionsschema (u. a. Icons, Pfeile, Anzeigen, erläuternde Texte, Bauteile eingefärbt, ausgeblendet, Animationen gestartet),
- Förderung selbstbestimmter explorativer Lernaktivitäten (sowohl individuell als auch peer-to-peer, u. a. Lerninhalte werden auf Tablets des Lehrenden auf der Lernenden synchron angezeigt damit zwischen geführten Unterrichtsabschnitten und Selbstlernphasen gewechselt werden kann),
- Virtuelle Lernwelten als aktiver Bestandteil authentischer Lernaktivitäten (u. a. Möglichkeit bei Verständ-

nisproblemen gezielt auf bestimmte Inhalte sofort zurückzugreifen oder vertiefende Erläuterungen anhand realer, anwenderspezifischen Datenauswertungen individuell oder gemeinsam zu geben) und

- Datenerfassungssysteme zur Bildung einer neuen Wissensbasis, sodass bei ähnlichen Problemen in Zukunft schneller und gezielt gehandelt werden kann.

Folgender Ablauf hat sich laut [13] bei der Entwicklung neuer Lernmodule bewährt:

1. Themenauswahl und Sammlung von Fachinhalten: Bereits in der Anfangsphase sollte genau geprüft werden, ob sich das Thema für den Einsatz von Mixed Reality Learning eignet. Folgende Fragestellungen sollten diskutiert werden: Ist der Arbeitsbereich bei der Anwendung von AR bei Stillstand der Arbeitsaktivität gut einsehbar? Können die ablaufenden Prozesse gut beobachtet werden oder ist eher eine VR-Umgebung mit animierten 3D-Modell notwendig, um die Zusammenhänge nachvollziehen zu können? Ist es realistisch, ein aussagekräftiges 3D-Modell der betreffenden Bauteile beschaffen zu können? Sind weitere Datenerfassungsquellen notwendig, beispielsweise um Ist-Daten darzustellen?
2. Didaktische Einordnung in das Curriculum: Zur Unterstützung der Lehrenden sollte ein aussagekräftiger Verweis auf die Ausbildungsinhalte, möglichst anhand des Ausbildungsrahmenplans und der notwendigen Lernfelder erfolgen.
3. Persona-basierte Szenario-Entwicklung: Für die Entwicklung eines Lernmoduls ist es wichtig, es in der beruflichen Praxis einsetzen zu können. Nach [14], spielen Methoden zur exakten Beschreibung der handelnden Akteure eine wesentliche Rolle.
4. Technische Konzeption: Ein Konzept zur Vorbereitung des Lernmoduls und eine genaue Beschreibung der zu erstellenden Inhalte sollte erstellt werden. Diese können später als Grundlage zur Qualitätssicherung durch Fachexperten dienen.
5. Auswahl und Beschaffung: Eine große Hürde für die Modulerstellung liegt naturgemäß in der Beschaffung und Bearbeitung des 3D-Modells. Bauwerksinformationsmodelle bieten hierbei gute Grundlagen aus einfachen als auch komplexen Informationsmodellen auszuwählen. Hierbei gilt es abzuwägen, ob die üblicherweise notwendige Vereinfachung eines verfügbaren Modells zur Darstellung auf mobilen Endgeräten oder die Neuerstellung des Modells effizienter ist. Aufwendige Verfahren in der Ermittlung des räumlichen Ist-Zustands wie Laser Scanning und Foto-/Videogrammetrie spielen in Mixed Reality noch eine untergeordnete Rolle, da der Umwandlungsaufwand von Punktwolken in parametrische Modelle manuell und damit sehr hoch ist. Im Weiteren gilt es die Schnittstellenproblematik (offenes oder geschlossene Datenformate) zu lösen.
6. Beta-Test, Überarbeitung und Veröffentlichung des Lernmoduls: Es erfolgen die in Medienprojekten bekannten Prozessschritte der funktionsfähigen Umsetzung eines Prototyps und letztendlich eines anwenderfreundlichen (leistungsfähigen) Produkts in der Lernumgebung.

Menschliche Kompetenzen und technische als auch ortsgebundene Anforderungen sind bei einer erfolgreichen Implementierung erforderlich:

- Vertrautheit der Zielgruppe mit mobilen Endgeräten (u. a. Einweisungszeiten für die Nutzung und Affinität zur eingesetzten Technik beachten),
- Offenheit der Zielgruppe neuen Kommunikationsarten anzuwenden (u. a. automatisches Lernen an mobilen Endgeräten in Kleingruppen),
- Gestaltung der Lernumgebung (z. B. auswählen ausreichender Gegebenheiten vor Ort, u. a. geeigneten Projektraum oder auf der Baustelle),
- Mehrwert der neuer Lernform didaktisch begründen (u. a. warum vorhandene Lernanwendungen nicht ausreichend sind, z. B. Komplexität eines Bauteils oder Bauteilgruppe durch Reduktion, Kommentierung oder Anreicherung durch Zusatzinfos oder Wirkungsweise erweitern),
- Ergänzen der situativen Darstellung der Inhalte um zusätzliche Informationshappen und Datenelemente,
- Lehrenden als auch Lernende können gezielt auf bestimmte Bauteile hinweisen und zusätzliche Erläuterungen in den Unterricht einbauen (z. B. Identifizieren verschiedener Bauteilgruppen, Abläufe, Gefahrenstellen),
- Inhaltliche Umsetzungen von bauteilspezifischen und ablaufbezogenen Teilen der beruflichen Ausbildungsordnungen ermöglichen,
- Schnelle personalisierte Feedbackzyklen, um auf diese Weise im Unterricht direkt auf Verständnisprobleme reagieren zu können und Unklarheiten auszuräumen,
- Eignung und Verfügbarkeit von im Mobile Device-Bereich einsetzbaren 3D-Modellen (u. a. lassen sich aus BIM oder Geographischen Informationssystemen (GIS) aufgrund ihres Detailgrades und der damit verbundenen großen Datenmengen, Modelle nur mit großem Aufwand für die Nutzung an Tablets aufbereiten),
- Performance und Kompatibilität von 3D-Engines (u. a. Unity, Unreal) aus der Spielebranche bieten umfangreiche Funktionen und Tools, die viele Möglichkeiten zur Gestaltung von digitalen, interaktiven Inhalten bereitstellen. Es können dreidimensionale Welten, genauso wie Anweisungen oder Menüs erzeugt und bearbeitet werden.
- Für die Erstellung von Mixed Reality Anwendungen werden weitere Plugins oder Frameworks benötigt, die die vorhergenannten Funktionalitäten wie der Positionverfolgung oder ähnlichem übernehmen. Eine Fülle von Daten kommt bereits von internen Sensoren des HMD oder von extern, unter anderem Body Motion Tracking, Eye-Tracking.

In Zusammenfassung: Das besondere Potenzial neuer Lernformen ergibt sich aus der didaktisch zu begründenden Kombination von mobilem Lernen mit Tablets oder HMDs, dem Lernen in der Gruppe und der Nutzung virtueller oder augmentierter Inhalte. Zentrales Element ist ein verfügbares oder zu erstellendes 3D-Modell, mit dem sich die Lerninhalte veranschaulichen lassen und das an den Bauprozessen Zusammenhänge und Abläufe sichtbar gemacht werden können. Leider bieten vorhandene Informa-

tionen oftmals geringe Kompatibilität zu Ingenieurdaten. So werden beispielsweise manche 3D-Daten-Austauschformate korrekt importiert, sorgen aber für Performanceprobleme durch CAD-typische Präzision, das heißt sehr hohe Polygonanzahl in tesselierten Modellen. Mittlerweile existieren kommerzielle Erweiterungen für solche 3D-Engines, die einen automatisierbaren Workflow zur Konvertierung anbieten. Wichtig in der Entwicklung der Lernmodule ist die Unterstützung unterschiedlicher Zielplattform. Dazu gehören sowohl konventionelle PCs, als auch mobile Endgeräte mit den Betriebssystemen Android und iOS und auch Geräte, die eine virtuelle oder augmentierte Realität darstellen können.

5 Anwendungs- und Beispielszenarien

Die nachfolgenden Beispiele bieten Einblick in einige Forschungstätigkeiten der Autoren und dienen als Referenzen für die Optionen für die Nutzung von Mixed Reality.

5.1 AR in Laborpraktika der universitären Ausbildung

Eine Möglichkeit der Nutzung von AR liegt in der Anzeige und Kontrolle von Betriebsdaten direkt an der betroffenen Stelle einer Anlage. Häufig wird dies vor dem Hintergrund von Instandhaltungstätigkeiten betrachtet. In [15] wurde ein kooperativer Ansatz zur geleiteten Visualisierung von Betriebsdaten entwickelt, der Laborpraktika in der universitären Ausbildung unterstützt. Dabei werden die Rollen von Dozent und Student unterschieden. Dozenten haben Zugriff auf die Liste der Sensordaten, die sogenannten Sensordaten-Panels (Overlay mit konkreten Sensorwerten) samt ihrer Positionierung an der Maschine und die Steuerung der Sichtbarkeit der einzelnen Panels. Studenten können über die frei zugängliche Applikation die Sensorwerte einsehen, die der Dozent für diesen Moment freigeschaltet hat. Im Gegensatz zur bisherigen Vorgehensweise, die die Nutzung des Displays die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) nötig machte, können in den Lehrveranstaltungen nun einzelne Sensorwerte direkt an dem betroffenen Sensor dargestellt werden. Bild 6 zeigt die Studentenansicht (links) und die steuernde Dozentenansicht (rechts).



Bild 6. Kooperative AR-App mit Studentensicht (links) und Dozentenansicht (rechts)

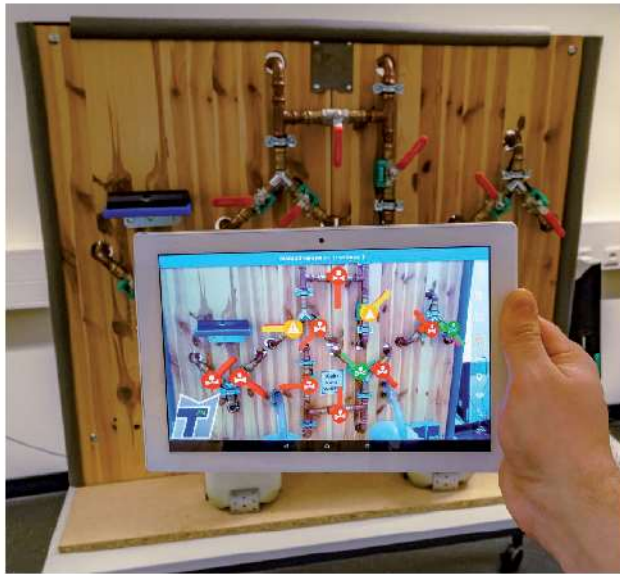


Bild 7. Instandhaltungsassistenzsystem mit dynamischen Arbeitsanweisungen (gelb markierte Ventile sind nicht vollständig geschlossen)

5.2 Kontextsensitive AR-Arbeitsanweisungen

In der chemischen Industrie nimmt die Instandhaltung von verfahrenstechnischen Anlagen durch jährliche Kosten, die bis zu 20 Prozent der Anschaffungskosten der Anlage betragen, eine zentrale Rolle ein. Trotz des stetigen Fortschritts der Informationstechnik treten Probleme in Bezug auf die Integration von realen Informationen und digitalen, anlagenbeschreibenden Dokumenten, mangelnde visuelle Transparenz von Arbeitsanweisungen und mangelhafte Rückführung von Änderungsinformationen nach Instandhaltungstätigkeiten auf.

In [16] stellten die Autoren ein dynamisches, graphenbasiertes Datenmodell auf, welches zur Verknüpfung von Fließbildern, Anlagenkomponenteninformationen und Echtzeitsensordaten zur Generierung von MR-Arbeitsanweisungen genutzt werden kann. Die Arbeitsanweisungen werden aus der Abweichung zwischen geplantem Sollzustand und dem tatsächlichem Ist-Zustand berechnet. Anschließend werden die nötigen Schritte in AR schrittweise visualisiert. Die AR Applikation ist für die Nutzung auf Tablets optimiert (Bild 7, oben) und umgeht die oben genannte Problematik der zwangsweisen beidhändigen Bedienung mit einem Pausierungsmodus. Das Kamerabild wird nicht weiter aktualisiert (d.h. das letzte aufgenommene Bild bleibt „eingefroren“) und nur die Betriebsdaten und die assoziierte Visualisierung wird aktualisiert. Bild 7 (unten) zeigt die Nutzung auf, welche die Vorteile der intuitiven Visualisierung mit freier Verfügbarkeit beider Hände kombiniert.

5.3 AV Stresssimulation

In [17] wird ein Szenario vorgestellt, welches die vorher gezeigte Laboranlage in eine AV Umgebung einbringt. Dabei dient die sensorbestückte Anlage als reales „Inputgerät“, während die Visualisierung vollständig in der abgeschlossenen Virtual Reality Brille erfolgt (Bild 8, oben). Die Anlage wird mithilfe von sogenannten Trackern genauso verfolgt wie die Brille und Controller des Nutzers (Outside-In-Tracking). Bild 8 (unten) zeigt die 3D-Szene aus Sicht des Nutzers.

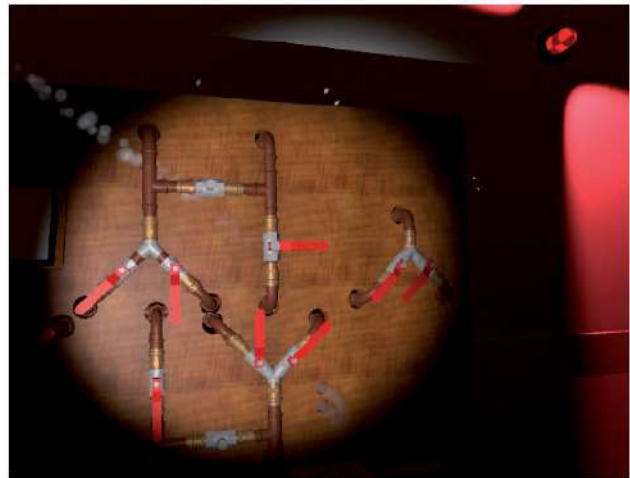


Bild 8. Augmented Virtuality (AV) zur Stress-Simulation (oben Außenansicht, unten Benutzersicht)

Durch die Abkapselung der Umgebung und die gezielte Einbringung der realen Anlage, können sämtliche Umgebungsparameter variiert werden und trotzdem die haptische Komponente der Bedienung erhalten bleiben. In Bild 8 wurde ein Ausfall der Beleuchtung simuliert, sodass der Nutzer nun mithilfe einer virtuellen Taschenlampe die reale Anlage bedienen muss, während die reale Umgebung normal beleuchtet ist. Besonders im Hinblick auf Stressszenarien ergeben sich hier neue Möglichkeiten, kritische Momente beliebig oft und ohne Konsequenzen für die Umgebung zu testen. So können Wasser- oder Dampfaustritte, Stromausfälle, Notbeleuchtung, Sirenen, elektronische Defekte und ähnliches zufallsgesteuert in Trainingsszenarien eingebracht werden. Der Aspekt der Gamification soll in Zukunft weiter ausgebaut werden, um individuelle Trainings motivierender zu gestalten. So lassen sich auch Extremsituationen, wie sie beispielsweise bei Evakuierungen stattfinden, realistisch aus der Ich-Perspektive (engl. First Person) erleben [18], [19].

5.4 AR in der Baustellensicherheit

Bei der Arbeit auf Baustellen kommt es während des Bauprozesses aufgrund fehlender Sicherheitsvorkehrungen immer wieder zu Unfällen. Beispiele sind Absturzsicherungen oft mangelhaft installiert oder gar nicht vorhanden. Nötige kosten- und zeitintensive Kontrollen dieser Sicherheitsmaßnahmen erfolgen bisher nur durch geschultes Perso-

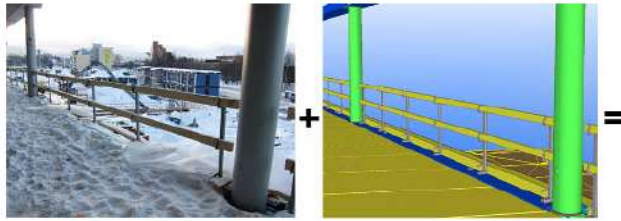


Bild 9. BIM-basierte Planung der Absturzsicherung mit anschließender AR-Visualisierung auf der Baustelle [20] (virtuelles Overlay der Soll- auf die Ist-Situation in Echtzeit)

nal. Ein Assistenzsystem das AR nutzt erweitert die reale Welt um eine virtuelle Komponente. So wird es möglich notwendige Absturzsicherungen in die Arbeitsumgebung auf der Baustelle zu projizieren. Mit dem AR-Framework Tango liefert Google viele weitere Features, um die Arbeitssicherheit auf Baustellen zu unterstützen. Dazu gehört die Verortung ohne GNSS in Gebäuden und das Ausmessen von Gefahrenstellen.

Gerade die letzten beiden genannten Punkte helfen bei der schnellen Meldung und Beseitigung von Fehlern an zu sichernden Absturzstellen (Ursache von fast 50 % aller Todesfälle der dt. Bauindustrie). Zur Unterstützung dieses Prozesses auf der Baustelle kann schon bei der Planung des Bauprojektes eine Markierung von Gefahrenstellen in einem BIM Gebäudemodell vorgenommen werden (bspw. Absturzkanten in Bild 9) [20], [21], [22], [23], [24]. Durch die Verortungsfähigkeiten des Assistenzsystems lassen sich die vorab geplanten Absturzsicherungen in BIM in die AR übertragen und sorgen so schon vor Baubeginn für eine Steigerung in der Bausicherheit. Mittels des Assistenzsystems wird auf der Baustelle die Lokalisation und Orientierung ermöglicht und bei Bedarf die benötigten Absturzbarrieren selbst platziert oder als Gefahrenstelle gemeldet, bis dass der gefundene Mangel behoben ist.

5.5 VR für sicheres Baustellentraining

Mit einer VR-Schulung sollen Anwenderinnen und Anwender die besonders riskanten Stellen und Situationen auf Baustellen kennenlernen, um damit Unfällen vorzubeugen. Und zwar auf genau der Baustelle, auf der sie später arbeiten oder für die sie als Arbeitsschutzplaner verantwortlich sind. Nach dem Baukastenprinzip, dienen Bauwerksinformationsmodelle als Grundlage für die Repräsentation der Baustelle in der virtuellen Realität. Damit die computergenerierte Baustelle einigermaßen naturgetreu aussieht, müssen sie Oberflächentexturen, Schatten und Umge-



Bild 10. Sichere Trainingsumgebung, um den sicheren Umgang mit Baumaschinen auf der „eigenen Baustelle“ zu erlernen [25]

bungsinformationen wie Häuser, Straßen und Bäume beinhalten. Auch die fahrenden Baumaschinen mit typischen oder realen Bewegungsabläufen dürfen nicht fehlen. Durch Geräusche wird das virtuelle Szenario noch realistischer. Die Bauarbeiter werden virtuell (in einer sicheren Umgebung die Fehler zulässt) geschult, jeweils nach den individuellen Bedürfnissen oder Arbeiten, die auf der Baustelle zu erledigen sind. Planer können damit Gefahrenquellen vorab lokalisieren und eliminieren. Nach dem TOP-Prinzip können weitere erforderliche Maßnahmen erfolgen und getestet werden, zum Beispiel die Installation zusätzlicher Absperrungen, um getrennte Laufwege von Personal am Boden nahe an Baumaschinen vorzugeben (Bild 10). Die Effektivität alternativer Lösungsansätze von identifizierten Problemen kann in Simulation erprobt werden.

6 Didaktisch-methodischer Mehrwert

Psychologische Studien in verschiedenen Anwendungsbe-reichen zeigen die Effektivität der Immersion in VR [26], [27]. Gerade die Betrachtung von Szenarien, in denen die Teilnehmer einer sonst gefährlichen oder tödlichen Gefahr ausgesetzt wären, wird durch eine sichere VR-Umgebung ermöglicht [28]. Dies erlaubt es Lerneffekte zu erzielen, die durch herkömmliche Trainings (fehlende Immersion) und praktische Übungen (reale Gefahr) nicht umsetzbar wären [29]. Auch das Training an Maschinen und Geräten zum Zwecke der Fort- und Weiterbildung kann durch eine MR-Umgebung unterstützt werden. Anwendungen dazu finden sich in verschiedenen Disziplinen, der Medizin und Operationstechnik [30], der Fabrikfertigung [31] und dem Bergbau [32]. Im Bereich der AV wurden verschiedene Forschungsansätze experimentell dargelegt. Unter anderem von [33] bei der Simulation eines Fahrzeugs, wobei eine reale Heckklappe als haptisches Element die Virtualität ergänzte. Eine Reihe an Literaturüberblicken in der internationalen Learning Sciences Forschung fassen die didaktisch-methodischen Vorteile des Lernens in „gemischten Realitäten“ zusammen [34], [35]. Es zeigten sich sowohl in formellen als auch informellen Lernkontexten die Förderlichkeit des Einsatzes von gemischten Realitäten [36], [37]. Die Vorteile des Lernens in gemischten Realitäten lassen sich folgendermaßen zusammenfassen und in den Anwendungskontext der Bauindustrie übertragen: Erstens, beugt das aktive Lernen in einer Mixed-Reality-Umgebung in Anlehnung an den Situated Learning Ansatz dem sogenannten

„trägem Wissen“ vor, weil die authentische Lernsituation der späteren Anwendungssituation sehr stark ähnelt und den Weg für einen erfolgreichen Transfer des Wissens der Auszubildenden in den Berufsalltag ebnet. Im Gegensatz zum üblichen einfachen Lernmaterial unterstreichen gerade die Interaktion mit virtuellen und teilweise realen Objekten aus der Ich-Perspektive und die damit verbundene tiefe Immersion des Lernenden in eine gemischte Realität den authentischen Charakter der Lernsituation. Zweitens, trägt die interaktive Manipulation von virtuellen und teilweise physischen Objekten und das eigenständige Üben von Handlungsabläufen in einer Mixed-Reality-Umgebung gemäß des Cognitive Apprenticeship Ansatzes dazu bei, das zentrale Ausbildungsziel „Selbstständiges Handeln“ zu unterstützen. Drittens, ermöglicht das Lernen in einer Mixed-Reality-Umgebung den Lernenden nicht nur sich sehr aktiv mit einem Lerngegenstand auseinanderzusetzen, sondern erlaubt darüber hinaus auch sich mit solchen Lerngegenständen auseinanderzusetzen, die in der Realität zu gefährlich wären. Viertens, erlaubt das Lernen in einer virtuellen Realität bestimmte Handlungsabläufe so häufig und demnach im eigenen Lerntempo und gemäß dem individuellen Lernfortschritt zu üben bis ein bestimmter Handlungsablauf sicher ausgeführt werden kann. Fünftens, können Ausbilder und Peers den Lernfortschritt eines einzelnen Lernenden in einer Mixed-Reality-Umgebung leichter überwachen, durch Peer- und Expertenfeedback unterstützen und bewerten, weil das dieses Lernen ein hohes Maß an Sichtbarkeit und Transparenz mit sich bringt. Sechstens, ermöglicht das Lernen in unterschiedlichen Realitätsstufen eine gewisse Ortsunabhängigkeit, da bestimmte Handlungsabläufe nicht mehr ausschließlich an einem bestimmten Gerät an einem bestimmten Ort eingeübt werden müssen.

7 Fazit und Ausblick

Das Fundament von Wachstum, Wohlstand und Arbeit in Deutschland ist ein funktionierendes Aus- und Weiterbildungssystem. Im Gegensatz zu anderen Industrien, erfolgt in der deutschen Bauindustrie die sogenannte Stufenausbildung (die betriebliche Ausbildung, die überbetriebliche Ausbildung in brancheneigenen Ausbildungszentren und die Berufsschule). Das zunehmende Bauvolumen stellt jedoch alle Beteiligten vor große Herausforderungen vorhandenes Wissen schnell und qualitativ hochwertig in die etablierten Bauprozesse einzubinden. Auch der Mangel an gut ausgebildeten Ingenieuren und Fachkräften wird laut Wirtschaftsstudien in den kommenden Jahren eher zunehmen.

Der vorliegende Artikel zeigt die Motivation und die technischen Grundlagen als auch Rahmenbedingungen für Mixed Reality Anwendungen in der Bauindustrie auf und verdeutlichte diese mit bereits durchgeführten Pilotprojekten aus der universitären Forschung und Industrieprojekten. Der didaktisch-methodische Mehrwert im Hinblick des mehrsprachigen Hintergrunds vieler Auszubildender wurde erläutert. Die sich daraus ergebenden Chancen wurden bewertet.

Danksagung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „DigiRAB (Digitale Regeln zum Arbeitsschutz auf Baustellen)“ wird im Rahmen des Programms „Zukunft der Arbeit“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Europäischen Sozialfonds (ESF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- [1] Piaget, J.: The construction of reality in the child. Basic Books Inc, New York, 1954.
- [2] Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F.: Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. In: *Photonics for Industrial Applications*: SPIE, Vol.: 2351 (1995), pp. 282–292.
- [3] Azuma, R.T.: A Survey of Augmented Reality. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6 (1997), Iss. 4, pp. 355–385.
- [4] Rekimoto, J.; Nagao, K.: The world through the computer. In: *Robertson, G.* (Hrsg.): *Proceedings of the 8th annual ACM symposium on User interface and software technology*. ACM Press, New York, 1995, pp. 29–36.
- [5] Forbes: Virtual Reality Headset Sales Hit 1 Million. <https://www.forbes.com/sites/paullamkin/2017/11/30/virtual-reality-headset-sales-hit-1-million> [Zugriff am: 15.01.2018].
- [6] Koch, C.; Neges, M.; König, M.; Abramovici, M.: Natural markers for augmented reality-based indoor navigation and facility maintenance. In: *Automation in Construction*, Vol. 48 (2014), pp. 18–30, DOI 10.1016/j.autcon.2014.08.009.
- [7] Tönnis, M.: *Augmented Reality. Einblicke in die Erweiterte Realität*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [8] Billinghurst, M.; Clark, A.; Lee, G.: A Survey of Augmented Reality. In: *Foundations and Trends in Human–Computer Interaction*, Vol. 8 (2015), Iss 2–3, pp. 73–272.
- [9] Dörner, R.; Broll, W.; Grimm, P.; Jung, B. (Hrsg.): *Virtual und Augmented Reality (VR/AR). Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Springer Vieweg, Berlin, 2013.
- [10] Van Krevelen, D.W.F.; Poelman, R.: A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. In: *International Journal of Virtual Reality*, Vol. 9 (2010), Iss 2, p. 1–20.
- [11] Azum, R.T.: The Most Important Challenge Facing Augmented Reality. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 25 (2016), Iss. 3, pp. 234–238.
- [12] Jung, T.; tom Dieck, M. (Hrsg.): *Augmented Reality and Virtual Reality. Empowering Human, Place and Business*. Springer International Publishing, Basel, 2018.
- [13] Fehling, D.; Goertz, L.; Hagenhofer, T.: *Social Augmented Learning, Didaktisches Konzept*, www.social-augmented-learning.de [Zugriff am: 1.8.2018].
- [14] Grudin, J.; Pruitt, J.: Personas, Participatory Design and Product Development: An Infrastructure for Engagement. In: *Binder, T.; Gregory, J.; Wagner, I.* (Hrsg.): *Proceedings of the Participatory Design Conference*, Malmö, 2002.
- [15] Neges, M.; Wolf, M.; Kuska, R.; Frerich, S.: Framework for Augmented Reality Scenarios in Engineering Education. In: *Auer, M. E.; Langmann, R.* (Hrsg.): *Smart Industry & Smart Education. Proceedings of the 15th international Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation*. Springer International Publishing, Basel, 2018, pp. 207–216.

- [16] Neges, M.; Wolf, M.; Abramovici, M.: Enabling Round-trip engineering between P&I Diagrams and Augmented Reality Work instructions in maintenance processes utilizing graph-based modelling. In: Burduk, A., Mazurkiewicz, D. (Hrsg.): Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance – ISPEM 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 637, Springer International Publishing, Basel, 2017, DOI 10.1007/978-3-319-64465-3_4.
- [17] Neges, M.; Adwernat, S.; Abramovici, M.: Augmented Virtuality for maintenance training simulation under various stress conditions. In: Procedia Manufacturing, Vol. 19 (2018), pp. 171–178.
- [18] Hilfert, T.; König, M.: Low-cost virtual reality environment for engineering and construction. In: Visualization in Engineering, Vol. 4 (2016), Iss. 2, DOI 10.1186/s40327-015-0031-5.
- [19] Rüppel, U.; Schatz, K.: Designing a BIM-based serious game for fire safety evacuation simulations. In: Advanced Engineering Informatics, Vol. 25 (2011), Iss. 4, pp. 600–611.
- [20] Zhang, S.; Sulankivi, K.; Kiviniemi, M.; Romo, I.; Eastman, C.M.; Teizer, J.: BIM-based Fall Hazard Identification and Prevention in Construction Safety Planning. In: Safety Science, Vol. 72 (2015), pp. 31–45, DOI 10.1016/j.ssci.2014.08.001.
- [21] Teizer, J.; Melzner, J.; Wolf, M.; Golovina, O.; König, M.: Automatisierte 4D-Bauablaufvisualisierung und Ist-Datenerfassung zur Planung und Steuerung von Bauprozessen. In: VDI-Bautechnik, Jahresausgabe Bauingenieur 2017/2018 (2017), S. 129–135.
- [22] Teizer, J.; Melzner, J.: Sicherheitstechnische Planung von Hoch- und Ingenieurbauprojekten mithilfe von Bauwerksinformationsmodellen (BIM). In: VDI-Bautechnik, Jahresausgabe Bauingenieur 2015/2016 (2015), S. 128–135.
- [23] Melzner, J.; Teizer, J.; Zhang, S.; Bargstädt, H.-J.: Objektorientierte sicherheitstechnische Planung von Hochbauprojekten mit Hilfe von Bauwerksinformationsmodellen. In: Bauingenieur 88 (2013), Heft 11, S. 471–479.
- [24] Teizer, J.; Melzner, J.: Building Information Modeling – Technologische Grundlagen und industrielle Anwendungen: BIM im präventiven Arbeits- und Gesundheitsschutz. In: Borrmann, A.; König, M.; Beetz, J.; Koch, C. (Hrsg.): Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. VDI-Buch. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, S. 305–320, DOI 10.1007/978-3-658-05606-3_19.
- [25] Hilfert, T.; Teizer, J.; König, M.: First Person Virtual Reality for Evaluation and Learning of Construction Site Safety. In: Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2016.
- [26] Rademacher, M.H.: Virtual Reality in der Produktentwicklung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014.
- [27] Eichenberg, C.: 2007. Einsatz von „virtuellen Realitäten“ in der Psychotherapie. In: Psychotherapeut 52 (2007), Heft 5, S. 362–367.
- [28] Lovreglio, R.; Gonzalez, V.; Amor, R.; Spearpoint, M.; Thomas, J.; Trotter, M.; Sacks, R.: The Need for Enhancing Earthquake Evacuee Safety by Using Virtual Reality Serious Games. In: Conference: Lean & Computing in Construction Congress (LC3) 2017, Heraklion, 2017.
- [29] Aim, F.; Lonjon, G.; Hannouche, D.; Nizard, R.: Effectiveness of Virtual Reality Training in Orthopaedic Surgery. In: Journal of Arthroscopic and Related Surgery, Vol. 32 (2016), Iss. 1, p. 224–232.
- [30] Matsas, E.; Vosniakos, G.-C.: Design of a virtual reality training system for human-robot collaboration in manufacturing tasks. In: International Journal on Interactive Design and Manufacturing, Vol. 11 (2017), Iss. 2, p. 139–153.
- [31] Kassem, M.; Benomran, L.; Teizer, J.: Virtual environments for safety learning in construction and engineering: seeking evidence and identifying gaps for future research. In: Visualization in Engineering, Springer, Vol. 5 (2017), DOI 10.1186/s40327-017-0054-1.
- [32] Grabowski, A.; Jankowski, J.: Virtual Reality-based pilot training for underground coal miners. In: Safety Science, Vol. 72 (2015), p. 310–314.
- [33] Roy, R.; Stark, R.; Tracht, K.; Takata, S.; Mori, M.: Continuous maintenance and the future – Foundations and technological challenges. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 65 (2016), Iss. 2, pp. 667–688.
- [34] Dunleavy, M.; Dede, C.; Mitchell, R.: Affordances and Limitations of Immersive Participatory Augmented Simulations for Teaching and Learning. In: Journal of Science Education and Technology, Vol. 18 (2009), pp. 7–22, DOI 10.1007/s10956-008-9119-1.
- [35] Wu, H.-K.; Lee, S. W.-Y.; Chang, H.-Y.; Liang, J.-C.: Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. In: Computers & Education, Vol. 62 (2013), pp. 41–49.
- [36] Stumpf, R.; Il, J.; Douglass, J.; Dorn, R. I.: Learning desert geomorphology virtually versus in the field. In: Journal of Geography in Higher Education, Vol. 32 (2008), Iss. 3, pp. 387–399.
- [37] Yoon, S.; Lin, J.; Anderson, E.; Elinich, K.: How augmented reality enables conceptual understanding of challenging science content in a science museum: A case of Bernoulli's Principle. In: Journal of Educational Technology & Society, Vol. 20 (2017), Iss. 1, pp. 156–168.