

Augmented Reality im Bauwesen: Teil 2 – Baustellentaugliches Trackingsystem

H. Urban, T. Irschik, Ch. Schranz, Ch. Schönauer

ZUSAMMENFASSUNG Building Information Modeling (BIM) etabliert sich immer mehr in der Planungsphase als auch in der Ausführungsphase. Augmented Reality (AR) ermöglicht die Verwendung von BIM direkt auf der Baustelle und fördert somit den verstärkten Einsatz von BIM im Bauprozess. Sowohl Tablets als auch Datenbrillen können für AR zum Einsatz kommen. Datenbrillen bieten aus Sicht der Autoren in Zukunft einige wichtige Vorteile für den Einsatz auf der Baustelle – bei ihnen bleiben zum Beispiel die Hände frei. Für einen produktiven Einsatz der AR-Datenbrille ist die jederzeit richtige Positionierung (auch Tracking genannt) des virtuellen Modells auf der Baustelle essentiell. Die Baustelle stellt dabei aufgrund der äußeren Rahmenbedingungen große Herausforderungen an das Trackingsystem. Viele Oberflächen sind relativ gleichmäßig grau oder weiß. Suboptimale Lichtverhältnisse und kaum dauerhafte Erkennungspunkte erschweren zusätzlich das Tracking. Im Projekt AR-AQ-Bau beschäftigen sich die Autoren mit der Übertragung von BIM auf die Baustelle mittels AR-Datenbrillen und führten dazu verschiedene Trackingtests durch. Dieser Artikel zeigt vorhandene Probleme und mögliche Lösungen für das Tracking des AR-Modells auf Baustellen.

STICHWÖRTER

Forschung und Entwicklung, Augmented Reality, Building Information Modeling, Tracking

1 Einleitung

Die fortschreitende Digitalisierung im Bauwesen bereitet dem Einsatz neuer Technologien den Weg. Innovationstreibend ist dabei das vielfältige Potential von BIM [1]. Eine dieser neuen Technologien ist Augmented Reality (AR), welche laut Azuma [3] drei Charakteristika aufweist: Kombination von realer und virtueller Umwelt, Interaktion in Echtzeit und Registrierung in drei Dimensionen. Es fällt unter die Mixed Realities in Milgrams Realitäts-Virtualitätskontinuum [4], [5] und platziert virtuelle Elemente oder Modelle in einer realen Umgebung. Aus diesen Gründen findet AR immer stärker ihren Weg in die Baubranche und damit auf Baustellen [6], [7].

Im Forschungsprojekt AR-AQ-Bau (Einsatz von Augmented Reality zur Abnahme und Qualitätssicherung auf Baustellen) beschäftigt sich ein interdisziplinäres Forschungsteam mit der Weiterentwicklung von AR für den Einsatz auf Baustellen [8]. Das Forschungsteam führte dazu eine Anwendungs- und Anforderungs-

Augmented Reality in Civil Engineering: Part 2 – site-compatible tracking system

ABSTRACT Building Information Modeling (BIM) is becoming more and more established in the planning phase as well as in the execution phase. Augmented Reality (AR) enables the use of BIM directly on the construction site and thus promotes the increased use of BIM in the construction process. Both tablets and smart glasses can be used for AR. From the authors' point of view, smart glasses will offer some important advantages for use on the construction site – mainly because they are hands-free. The correct tracking of the virtual model on the construction site at all times is essential for the productive use of AR smart glasses. The construction site poses great challenges to the tracking system due to the external conditions. Many surfaces are relatively evenly gray or white. Suboptimal lighting conditions and hardly any permanent detection points make tracking more difficult. In the AR-AQ-Bau project, the authors deal with the transfer of BIM to the construction site using AR smart glasses. They carried out various tracking tests. This article shows existing problems and possible solutions for tracking the AR model on construction sites.

ungsanalyse durch (Schranz et al [9]). Diese Anwendungsanalyse zeigte, dass schon viele Firmen AR-Applikationen für und auf Baustellen testen (z. B. Doka [10], Schöck [11], die Baufirma Porr mit Gamma-AR [12] oder die Baufirma Strabag).

Eine wesentliche Anforderung an einen produktiven Einsatz ist die genaue Positionierung des virtuellen Modells in der realen Umgebung. Einige Anwendungsfälle haben hohe Ansprüche an die Genauigkeit der Positionierung, zum Beispiel zur Aufzeichnung des Bau(end)zustands für die Ausführungsdokumentation oder zur Abrechnung von Kosten. Diese Positionierung erfolgt über das Tracking.

Das Tracking ist der grundlegende Bestandteil beim Erstellen des 3D-Umgebungsmodells durch SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [13]. SLAM beschreibt die simultane Aufzeichnung der Umgebung sowie ihrer relativ zum Beobachter liegenden Position, wofür ebenso die Position des Beobachters aufgezeichnet werden muss. Das Einmessen der Umgebung relativ zum Beobachter erfolgt durch mehrere, unabhängige Messsysteme-

me. Die aufgenommenen Daten werden gleichzeitig bewertet und mittels geeigneter mathematischer Algorithmen zusammengesetzt. Daraus entsteht das 3D-Umgebungsmodell. Bei der Verarbeitung der Messergebnisse müssen Testalgorithmen zwischengeschaltet werden, die die aufgezeichneten Daten hinsichtlich ihrer Konfidenz analysieren und zwischen zu verarbeitenden, guten Umgebungsmerkmalen und zu verworfenden, schlechten Umgebungsmerkmalen differenzieren. Zusätzlich kommen bereits während der Aufnahme Schätzalgorithmen zum Einsatz, die der Voraussage der im Folgeschritt aufgenommenen Umgebung dienen. Dies soll eine rasche, möglichst latenzfreie Aufnahme und Verarbeitung der Folgeumgebung garantieren.

Akkurates Tracking ist die grundlegende Voraussetzung für die produktive Anwendung von AR im Baustellenbetrieb, da nur dadurch die proportionale und ortsrichtige Projektion virtueller Objekte in einer realen Umgebung sichergestellt ist. Gleichzeitig stellt ein baustellentaugliches Tracking die höchsten Ansprüche an die derzeit zur Verfügung stehende Technologie. Baustellen weisen generell einige Merkmale auf, die die Anforderung für das genaue Positionieren definieren [14]. Die Diversität der Bauwerke ist sehr groß (z. B. Einfamilienhaus, Konzertsaal, Linienbauwerk). Die Anzahl an vorhandenen, für das Positionieren wichtigen, unterscheidbaren Merkmalen und die Beschaffenheit der Umgebung variiert stark über die Bauzeit (z. B. Rohbauphase, Ausbauphase). Baustellentätigkeit findet zu jeder Tageszeit im Freien sowie innerhalb von Bauwerken unter stark unterschiedlicher Belichtungssituation statt.

Weitere Baustellenverhältnisse wirken sich erschwerend auf das Tracking aus. Direktes Sonnenlicht kann die Sensoren der AR-Brille stören und die im Bauzustand oft sehr gleichmäßig grauen Oberflächen bieten wenig Merkmale für die Tracking-Systeme.

Zusätzlich werden AR-Geräte auf Baustellen nicht nur lokal an einer Stelle verwendet, sondern die Benutzer bewegen sich damit über die Baustelle. Die ganze Zeit muss das virtuelle Modell immer richtig positioniert werden. Dabei kann es zu einem Drift kommen. Drift beschreibt in einem AR-Kontext vereinfacht die Abweichung zwischen der real eingenommenen Position des Betrachters und der durch die diversen Trackingalgorithmen berechneten Position [15]. Die berechnete Position ist dabei das Resultat aus der Aneinanderkettung der einzelnen vom AR-Gerät gemessenen Positionswechsel. Der kumulierte Enddrift ergibt sich somit als Summe der Einzelabweichungen dieser auf Basis der Messdaten berechneten Positionswechsel zu den real durchgeführten Positionswechseln. Im hinterlegten Tracking-Modell eines AR-Tools ist der Drift durch Messen der Abweichung der Position eines Punktes zu seiner bekannten, realen Position identifizierbar. Im Allgemeinen ist es erstrebenswert, das Ausmaß des Drifts auf ein akzeptables Minimum zu beschränken. Dies gilt besonders, wenn AR-Tools zum Beispiel für das Erstellen von Aufmaßen herangezogen werden sollen.

Für die Untersuchung der Genauigkeit des Trackings von AR-Tools ist das Verstehen der Funktionsweise des Trackings wichtig.

2 Funktionsweise des Trackings

Im Forschungsprojekt AR-AQ-Bau benutzte das Forschungsteam für alle Untersuchungen die Datenbrille DAQRI Smart Glasses. Der AR-Brillenhersteller war ein Projektpartner im ersten Jahr des Forschungsprojekts. Daher wird in diesem Abschnitt die Funktionsweise des Trackings beispielhaft für diese AR-Brille beschrieben.

2.1 Tracking bei der AR-Brille DAQRI Smart Glasses

Die Positionsbestimmung beim Tracking der DAQRI Smart Glasses erfolgt zunächst über drei voneinander unabhängige Messapparate [14]. Eine Graustufenkamera mit einer Updaterate von 30 Hz zeichnet einen Videostream der Umgebung auf und eine inertielle Messeinheit (IMU) mit einer Updaterate von 1 600 Hz erfasst die Beschleunigung des HMDs respektive des Beobachters. Die beiden Aufnahmegeräte mit hochgradig unterschiedlichen Messraten gewährleisten eine gewisse Robustheit gegenüber Kurzzeit- und Langzeitdrift. Die Tiefenmessung erfolgt durch Infrarot-Streifenlichtprojektion mit einer Reichweite von bis zu 4 m [16]. Hierbei wird eine Daten-Punktwolke erzeugt [9], [17]. Bewerten und Zusammenführen der Informationen aus den drei Messeinheiten durch spezielle Algorithmen liefern das dreidimensionale Umgebungsmodell. Eine zusätzlich in der AR-Brille (auch als Head-Mounted-Device HMD bezeichnet) integrierte optische RGB-Kamera definiert die Färbung der Oberflächen im Modell.

Das Bestimmen der räumlichen Ausgangsposition im Trackingprozess erfolgt bei den DAQRI Smart Glasses durch einen QR-Code oder auf Basis von natürlichen Referenzpunkten [13]. Referenzpunkte werden AR-branchenüblich Features genannt – auch in diesem Artikel. Die Initialisierung durch einen QR-Code, bei DAQRI als Landmark bezeichnet, bringt aus der Sicht des Bauwesens betrachtet den Vorteil, dass verschiedene BIM-Fachmodelle und deren Versionen nachträglich überlagert und Unterschiede zwischen ihnen identifiziert werden können. Die auf dem Tracking natürlicher Features basierende Variante ohne Landmark kann im Baufortschritt zum Beispiel zu einem Zeitpunkt erfolgen, zu dem eine sinnvolle Positionierung eines QR-Codes noch nicht möglich ist.

2.2 Funktion Scan als Bewertungskriterium für das Tracking

Normalerweise findet das Tracking bei AR im Hintergrund statt. Der Anwender nimmt in der Regel lediglich die neu eingeblendeten, virtuellen Objekte in seinem realen Umfeld wahr. Da SLAM jedoch ohnehin die eigentliche Umgebung in ein virtuelles Modell überträgt, ist es naheliegend, dieses Umgebungsmodell ebenfalls in einem AR-Kontext zu realisieren.

DAQRI griff diesen Gedanken auf und entwickelte in Folge die Funktion Scan [18]. Statt durch zusätzliche virtuelle Objekte das reale Umfeld zu ergänzen, ist hier die virtuelle Komponente das in Echtzeit erzeugte Abbild der Umgebung selbst. Dieser Umstand ermöglicht es, die Aufzeichnung der Umgebung praktisch live mitzuverfolgen und erweitert sofort den Kenntnisstand des Anwenders über bereits erfasste und nicht erfasste Bereiche in Form eines direkten optischen Feedbacks. Dies stellt einen Vorteil gegenüber vielen herkömmlichen Vermessungsmethoden dar, weil eine rasche Reaktion auf versehentliche Aufnahmeleücken einfach und vor Ort möglich ist. Hier sei jedoch angemerkt, dass die Genauigkeit nicht an jene dieser Vermessungsmethoden heranreicht. Die Scan-Funktion kann jedoch Vorteile bei engen Situationen bringen, zum Beispiel in verwinkeltem Altbau. Eine Kombination von Laserscanner und Scandaten der AR-Brillen soll in Zukunft untersucht werden.

Der abgeschlossene Umgebungsscan kann anschließend in der von DAQRI entwickelten Software Scan Browser als maßstäbli-

ches 3D-Modell betrachtet, manipuliert und zur Weiterverarbeitung exportiert werden. Das resultierende Modell der Funktion Scan basiert aufgrund der Scan-Technologie auf den Ergebnissen des Trackings. Dies ermöglicht, das Modell gleichzeitig als fundierte Grundlage zur Bewertung des Trackings der DAQRI Smart Glasses heranzuziehen. Basierend auf dieser Überlegung führten die Autoren diverse Versuche durch, deren Ziel es war, die Grenzen von kommerziell verfügbarer Trackingssoftware hinsichtlich einer Anwendung auf Baustellen zu untersuchen.

Bei den folgenden Untersuchungen dient die Scan-Funktion als Maßstab für die Genauigkeit des Trackings.

3 Praxisnahe Tests

Das Tracking von Baustellen ist für AR-Geräte eine Herausforderung, da Baustellen im allgemeinen heterogene Umgebungen sind, die zahlreichen Umwelteinflüssen ausgesetzt sind. Baustellentaugliches Tracking muss somit flexibel auf unterschiedliche, örtliche Bedingungen reagieren können. Vorab müssen daher spezifische Anforderungen beziehungsweise Wünsche an die Ergebnisse eines baustellentauglichen AR-Trackingsystem postuliert werden, die Grundlage für dessen Bewertung sind. Zum einen darf die Belichtungssituation der Umgebung keinen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität des Trackings haben, da Baustellentätigkeiten zu jeder Tageszeit sowie über- und untertags stattfinden. Zum anderen müssen auch größere Räume mit vertretbarem Fehlermaß vermessen werden können. Der kumulierte Drift des Trackings muss dabei begrenzt sein. Ebenso ist es notwendig, dass die Baustelle trotz mangelhafter Ausstattung mit Referenzpunkten für das Tracking und monochromer Oberflächen, wie dies bei Betonwänden etwa in der Rohbauphase der Fall ist, exakt dokumentiert wird.

Die Autoren führten zahlreiche Tests anhand der DAQRI Smart Glasses durch, die das Tracking-Verhalten bei diesen typischerweise auf Baustellen anzutreffenden Szenarien untersuchen. Der Fokus lag im ersten Schritt auf einer getrennten Untersuchung der zuvor genannten Parameter: Belichtungssituation, Raumgröße und Features.

3.1 Lichtverhältnisse im Freien

Als erstes wollten die Autoren eine grundsätzliche Voraussetzung für ein baustellentaugliches Trackingsystem untersuchen: Die Möglichkeit, ein Umgebungsmodell im Freien zu erstellen. Diese zunächst recht einfach wirkende Forderung ist aus technischer Sicht hochgradig relevant, da viele Trackingsysteme, wie auch das hier verwendete, für die Tiefenbestimmung auf ein auf Infrarot-Strahlen basierendes-System zurückgreifen. Das Sonnenlicht kann aufgrund seines breiten Lichtspektrums mit der Infrarot-Komponente des Trackingsystems des AR-Gerätes interferieren und damit die Qualität des Trackings massiv beeinflussen.

Die Versuche zur Feststellung des Einflusses von Sonnenlicht auf das Trackingsystem der DAQRI Smart Glasses wurden durch die Autoren durchgeführt. Im Versuch sollte eine Seite der Einhausung einer im Freien aufgestellten Brunnenkulptur durch die Funktion Scan erfasst werden. In **Bild 1** ist erkennbar, dass die Oberfläche der Einhausung eben ist und unterschiedliche Grautöne aufweist. Dargestellt ist darauf die eigentliche Brunnenkulptur. Die Messung der Beleuchtungsstärke erfolgte mittels Luxmeter unmittelbar vor und nach dem Scan an der Wandoberfläche



Bild 1. Einhausung einer Brunnenkulptur (mittels Screenshot-Funktion der DAQRI Smart Glasses aufgenommen) *Abb.: Irschik*
Fig. 1. Enclosure of a fountain sculpture (screenshot-function of DAQRI Smart Glasses) *Source: Irschik*

Tabelle 1. Beleuchtungsstärke in Lux am Scanbeginn und am Scanende
Table 1. Illuminance in Lux at the beginning and the end of the scan

	Wand		Boden	
	Scanbeginn	Scanende	Scanbeginn	Scanende
Scan 1	200	280	380	590
Scan 2	630	840	1080	1410

und am Boden neben der Einhausung. Die Autoren führten zwei Scans nacheinander bei unterschiedlicher Beleuchtungsstärke durch. Jeder Versuch benötigte in etwa fünf Minuten, die Gesamtdauer der Versuche circa 15 Minuten. Die gemessenen Beleuchtungsstärken der beiden Scans in Lux sind in **Tabelle 1** jeweils für den Versuchsbeginn und das Versuchsende dokumentiert.

Der erste Versuch (Scan 1) lieferte unter diesen Belichtungsverhältnissen einen guten, vollständigen Scan (**Bild 2**). Die Abbildung der Brunnenkulptur ist vollständig erfasst und als solche im Vergleich mit Bild 1 gut identifizierbar. Sogar die schräg nach unten verlaufenden, diagonalen Streifen werden im getrackten Modell dargestellt. Lediglich einige sehr dunkle beziehungsweise schwarze Bestandteile der Brunnenkulptur erscheinen im Modell zu hell. Die Aufzeichnung dieser Stellen benötigte bereits während des Scanvorgangs etwas länger als die restlichen Flächen. Der zweite Versuch (Scan 2) mit einer deutlich helleren Belichtungssituation hatte andere Ergebnisse zur Folge. In diesem konnten die hellen Bereiche der Einhausung nicht mehr registriert werden. Der Scan weist an diesen Stellen bereits im unteren Bereich der Einhausung Lücken auf. Ewa auf halber Höhe der Einhausung bricht der getrackte Bereich vollständig ab (**Bild 3**). Die hellen Oberflächen reflektieren in diesem Bereich zu viel Sonnenlicht, das mit der Sensorik des AR-Gerätes interferiert.

Zusammenfassend zeigen die Versuche, dass im Außenbereich (unter Einfluss von direktem Sonnenlicht mit mehr als 800 Lux) derzeit nur eine sehr eingeschränkte Zeitspanne zur Verfügung steht, in der das Trackingsystem des AR-Gerätes einwandfrei funktionstüchtig ist. Es ist davon auszugehen, dass bei herkömmlichen, infrarotbasierten Trackingsystemen ab einer Beleuchtungsstärke von rund 800 Lux Probleme auftreten können. Vor allem das breite Lichtspektrum des Sonnenlichts bereitet Probleme, während Scans in Innenräumen mit rein künstlicher Beleuchtung (weit unter 800 Lux) dieses Problem nicht aufwies. Eine mögliche Abhilfe könnten die hardwareseitige Auswahl eines anderen Wellenlängenbereichs im Infrarot-Spektrum [16] oder der Einsatz stärkerer Infrarot-Strahlen bieten. Sollten dann stärkere In-



Bild 2. Scan 1 der Einhausung einer Brunnenskulptur mit guten Ergebnissen bei geringer Beleuchtungsstärke *Abb.: Irschik*
 Fig. 2. Scan 1 of the enclosure of a fountain sculpture with good results with lower illuminance *Source: Irschik*



Bild 3. Scan 2 der Einhausung einer Brunnenskulptur mit schlechten Ergebnissen bei stärkerer Beleuchtungsstärke *Abb.: Irschik*
 Fig. 3. Scan 2 of the enclosure of a fountain sculpture with poor results with higher illuminance *Source: Irschik*

farrot-Strahlen zur Anwendung kommen, sind diese in Österreich nach ÖVE/ÖNORM EN 60825-1 [19] gesetzlich reglementiert.

3.2 Raumgröße von Innenräumen

Die Genauigkeit des Trackings bei Bewegung hängt auch von der Raumgröße ab. Bei einer Bewegung mit einem AR-Gerät im Raum kommt es zu Abweichungen in der Positionierung des virtuellen Modells – dem Drift. Die Trackingsysteme der AR-Geräte müssen auch bei größeren Bewegungen ohne grobe Abweichungen funktionieren. Erst dann können die AR-Tools als Grundlage für zum Beispiel Massenermittlungen, Aufmaßberechnungen oder zur Prüfung von Toleranzmaßen verwendet werden. Die Autoren führten daher Versuche durch, bei denen der kumulierte Drift des Trackingsystem anhand der im Scan generierten Modelle gemessen wurde.

Die Tests fanden in geschlossenen Räumen statt, die gegen Sonnenlicht abgeschottet waren und durch künstliche Belichtung gut ausgeleuchtet wurden. Die Scans erfolgten in Räumen mit unterschiedlich großen Grundrissen innerhalb der Technischen Universität Wien.

- Raum 1 – Abmessungen: 4,50 m x 5,95 m; 26,78 m², Umfang: 20,90 m
- Raum 2 – Abmessungen: 6,10 m x 7,20 m; 43,92 m², Umfang: 26,60 m
- Raum 3 – Abmessungen: 8,40 m x 19,70 m; 165,48 m², Umfang: 56,20 m

Bild 4 zeigt die Versuchsmethodik schematisch für Raum 1. In den Versuchen wurden die Räume einmalig im Kreis herum ab-

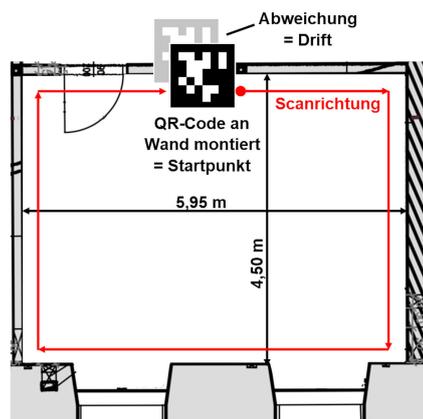


Bild 4. Versuchsablauf zu Bestimmung der Abweichungen im Trackingmodell *Abb.: Irschik*
 Fig. 4. Test procedure to determine the deviations in the tracking model *Source: Irschik*



Bild 5. Scan Raum 1: kein messbarer Drift vorhanden *Abb.: Irschik*
 Fig. 5. Scan room 1: no measurable drift existing *Source: Irschik*

gegangen. Startpunkt und Endpunkt bildeten die zur Initialisierung der Scans verwendeten Marker (ein an der Wand angebrachter QR-Code). Die beim Scannen erfassten Bauteile umfassen die Wände inklusive des angrenzenden Bodens sowie etwaige an den Wänden angebrachte Gegenstände. Die Beurteilung des Driftverhaltens erfolgt über die im Modell vorgenommene Messung des Abstands zwischen der Position des Markers beim Initialisieren und der Position des Markers nach einmaligem Rundgang und Scan des Raums.

Der gemessene, kumulierte Drift variiert stark mit der Raumgröße und somit dem zurückgelegten Weg. In Raum 1 liegen die Marker nach Rundumscan exakt übereinander, sodass keine Lageabweichung messbar ist (**Bild 5**). In Raum 2 liegen die beiden Marker zwar in derselben Wandebene (keine Abweichung normal zur Wandebene), jedoch sind diese zueinander 14 cm horizontal verschoben. Dies ist auch am Rahmen des dahinterliegenden Whiteboards erkennbar (**Bild 6**). In Raum 3 weicht die Endposition der Landmark zu ihrer Ursprungsposition in allen drei Raumrichtungen signifikant ab (**Bild 7**). Die innerhalb der Wandebene auftretenden Verschiebungen des QR-Codes betragen 114 cm in horizontaler und 87 cm in vertikaler Richtung. Zusätzlich ist eine Verschiebung von 40 cm normal zur Wandebene festzustellen. Die Abweichung in vertikaler Richtung ist besonders interessant, da im Raum keine Höhenlagedifferenz existiert. Bild 7 zeigt die Wände in grauer sowie weißer Farbe und ohne Texturen. Dies deutet auf die Schwierigkeiten des Scansystems mit der richtigen Erfassung der Wand nach langen Scanwegen hin.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind aus Sicht der Autoren für bis etwa 30 m² Raumgröße brauchbar. Mit zunehmenden

der Größe verschlechtert sich das Driftverhalten des Trackings jedoch, sodass AR-Tools etwa bei großen Hallen oder Sälen ohne zusätzliche Kalibrierungspunkte derzeit nicht praktikabel sind.

3.3 Anzahl an Features

Während des Baus durchläuft ein Gebäude verschiedene Entwicklungsstadien. Zu Beginn beziehungsweise während des Rohbaus wirken Baustellen zunächst relativ schlicht. Ausgeschaltete Wände und Decken mit dem einen oder anderen Durchbruch sind prägend. Gerade solche Umstände sind für das Tracking mit AR-Tools jedoch besonders schwierig, da markante Features fehlen. Aus diesem Grund testeten die Autoren, inwiefern sich Änderungen bei Abstand und Häufigkeit solcher Features auf die Qualität des Trackings der DAQRI Smart Glasses auswirken. Als solche Features dienen für die AR-Geräte erkennbare Merkmale auf den realen Oberflächen.

Die Tests mit unterschiedlicher Anzahl an Features erfolgten in Raum 1 (Bild 4). Der Raum befand sich zum Versuchszeitpunkt in einem frisch ausgemalten Zustand ohne Einrichtungsgegenstände. Die einzigen nennenswerten, bereits vorhandenen Features umfassen an der Fensterseite einen Kabelkanal sowie Heizkörper in den Fensternischen. An der gegenüberliegenden Wand befinden sich der zur Initialisierung verwendete Marker sowie eine Tür. Die Durchführung der Tests erfolgte erst nach Sonnenuntergang unter künstlichem Licht, um den Einfluss von Sonnenlicht auf die Qualität der Ergebnisse auszuschließen.

Die Versuchsmethodik entspricht derselben, wie in Bild 4 vorgestellt. An sämtlichen Wänden befanden sich zusätzliche Features in Form gedruckter, schwarzer Symbole mit einer Größe von etwa 10 x 10 cm in einem Abstand von bis zu 1 m (Bild 8). Zwischen den Versuchen wurde die Anzahl der Features je Wand reduziert. Zuletzt erfolgte ein Scan ohne zusätzliche Features.

Die Auswertung der Versuche zeigte, dass mit zusätzlichen Features im Raum sehr gute Trackingergebnisse erzielt werden. Dies zeigen auch die Scan-Modelle in Bild 9 (bzw. Bild 5, das ein Ausschnitt des linken Modells aus Bild 9 ist). Im linken Modell in Bild 9 beträgt der Abstand der Features bis zu 1 m, im rechten Modell bis zu 2 m. Bei beiden Versuchen konnten alle Eigenschaften und Abmessungen während des Scans erfasst werden. Der kumulierte Drift ist so gering, dass dieser im Modell nicht messbar ist.

Die Versuche ohne zusätzliche Features lieferten schlechtere Ergebnisse. Hier treten Faltungen im Modell auf, die den Raum stark verzerren. Dieses Verhalten konnte unabhängig davon beobachtet werden, ob nur ein Wandstreifen oder auch der anliegende Boden im Scan erfasst wurde (Bild 10). Ursache für den Modellierungsfehler scheint in erster Linie der Ausfall der Graustufenkamera zu sein. Dadurch basiert das Tracking im Wesentlichen ausschließlich auf der inertialen Messeinheit (IMU), die aufgrund der hohen Updaterate von 1 600 Hz bereits nach kurzer Zeit hohen Drift produziert. Auffällig ist außerdem, dass die Faltungen an den kürzeren Wänden des Raums auftreten. Es ist daher möglich, dass die Fensternischen beziehungsweise die Tür und der zur Initialisierung verwendete QR-Code bereits eine hinreichende Anzahl an Features für das Tracking darstellen.

Abschließend kann zum Versuch festgehalten werden, dass bereits wenige Features für akkurate Trackingmodelle ausreichend sind. Diese müssen allerdings kontinuierlich im Raum verteilt sein. Wesentlich bei der Verteilung der Features ist, dass diese in solchem Abstand liegen, dass je zwei benachbarte Features noch

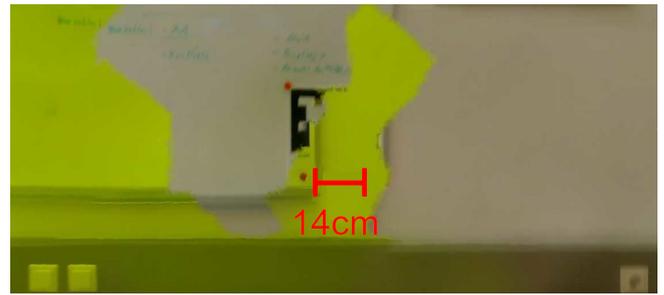


Bild 6. Scan Raum 2: horizontaler Drift von 14 cm *Abb.: Irschik*
Fig. 6. Scan room 2: horizontal drift of 14 cm *Source: Irschik*

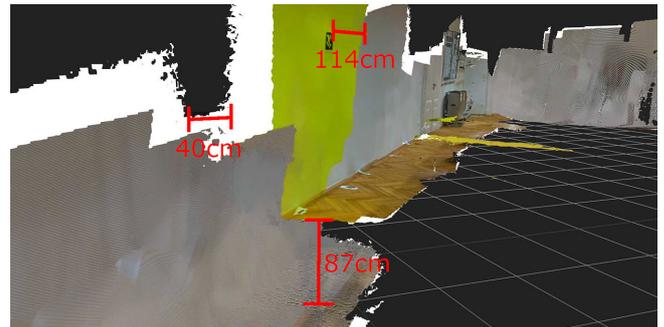


Bild 7. Scan Raum 3: Drift in alle drei Richtungen (114 cm horizontal, 87 cm vertikal, 40 cm normal zur Wandebene) *Abb.: Irschik*
Fig. 7. Scan room 3: drift in all three directions (114 cm horizontal, 87 cm vertical, 40 cm out of plane) *Source: Irschik*



Bild 8. Versuchsraum mit unterschiedlicher Anzahl an Features (mittels Screenshot-Funktion der DAQRI Smart Glasses aufgenommen) *Abb.: Irschik*
Fig. 8. Test room with different number of features (screenshot-function of DAQRI Smart Glasses) *Source: Irschik*

gleichzeitig von der Graustufenkamera erfasst werden. Ist dies nicht der Fall, verringert sich die Qualität der Trackingmodelle massiv. Zusammenklappende oder kippende Wände sind die Folge, der eigentliche Raum ist im Modell nicht wiedererkennbar. Die Ergebnisse sind dennoch zufriedenstellend. Denn auch Räume ohne spezielle Features besitzen oft etliche vom Trackingsystem aufnehmbare Features, wie zum Beispiel geringe Farbsprünge.

3.4 Baustellentests (Bruck an der Leitha)

Bereits bei einem Baustellentest konnte die Funktion des Trackings gezeigt werden. Im Zuge des Forschungsprojekts wurden gemeinsam mit dem Forschungspartner FCP bei einer Baustelle (Autobahnmeisterei Bruck an der Leitha, Österreich) ein Bereich mit zuvor errichteten Gipskartonwände gescannt. Alleine die Be-

festigungspunkte und Fugen der Gipskartonwände genügten für einen ausreichend genauen Scan (und somit verlässliches Tracking) des Baubereichs (Bild 11).

Ein Problem stellen jedoch neu installierte, stark reflektierende Haustechnikleitungen auf Baustellen dar. Im Bereich dieser Leitungen stellten die Autoren noch größere Abweichungen im Tracking der DAQRI Smart Glasses fest.

Generell sind noch weitere Verbesserungen sowohl auf Hardware- als auch der Softwareseite für einen umfassenden Baustelleneinsatz erforderlich.

4 Verbesserungsmöglichkeiten des Trackingsystems

Visuelles Tracking im Baustellenumfeld ist (wie oben ausgeführt) eine große Herausforderung, da eine ausreichende Dichte an Features sowie eine gleichmäßige Ausleuchtung nicht garantiert sind. Mangelnde Textur durch viele einfarbige Beton- oder Verputzflächen und extrem unausgeglichene Lichtverhältnisse durch zum Beispiel Bauscheinwerferbeleuchtung erschweren die optische Erfassung der Umgebung. Andererseits kann man sich den Umstand zu Nutze machen, dass es sich bei einer Baustelle um ein künstliches Umfeld handelt, dessen zu erwartende grobe Struktur im BIM-Modell vorgehalten ist. Diesen Bedingungen entsprechend entwickeln und integrieren die Autoren neue Methoden, um das Trackingsystem auch in Extremsituationen im Baustellenumfeld robuster zu machen. Die erste dieser neuen Methoden projiziert Laser-Features auf untexturierte Flächen. Die zweite Methode verwendet die aus dem BIM-Modell bekannte 3D-Struktur, um den Drift des Trackingsystems zu reduzieren beziehungsweise zu korrigieren.

4.1 Erhöhung der Featuredichte mittels Laserprojektion

Für die Projektion eines umgebungsunabhängigen Feature-Musters entwarfen die Autoren einen mobilen Projektor basierend auf einem Lasermodul und verschiedenen optischen Komponenten. Der Projektor spaltet den einzelnen Laserstrahl an einem Beugungsgitter in 121 Strahlen auf, die über eine Spiegelanordnung in Form eines pseudozufälligen Punktmusters weitwinkelig an Decke und/oder Wand projiziert werden. Bild 12 zeigt den Projektor und das resultierende Punktmuster bei Projektion aus kurzer Distanz auf eine Wand. Der Projektor wird auf der Baustelle nach Bedarf im betreffenden Raum positioniert und auf geeignete Flächen ausgerichtet.



Bild 11. Scan von Gipskartonplatten (links), daraus erstelltes Umgebungsmodell in BIM eingebettet (rechts) Abb.: FCP
 Fig. 11. Scan of plasterboard (left), the resulting environmental model embedded in BIM (right) Source: FCP

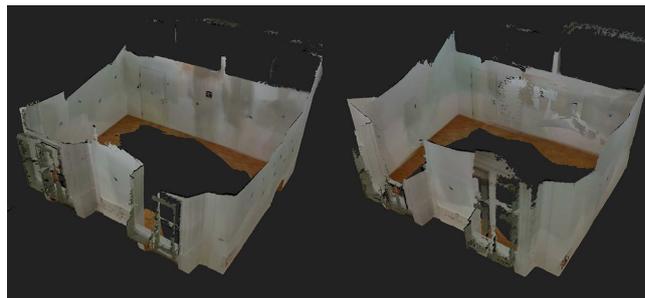


Bild 9. Gute Ergebnisse beim Tracking mit unterschiedlichen Feature-Abständen: ≤ 1 m (links), ≤ 2 m (rechts) Abb.: Irschik

Fig. 9. Good results when tracking with different feature distances: ≤ 1 m (left), ≤ 2 m (right) Source: Irschik



Bild 10. Tracking ohne Features, das Modell weist Faltungen auf Abb.: Irschik
 Fig. 10. Tracking without feature, the model has folds Source: Irschik

Die meisten optischen Trackingalgorithmen bauen auf natürlichen Features auf, die auf flächigen Helligkeitsverläufen basieren. Im Gegensatz zu den natürlichen Features verwenden die Laserfeatures einzelne Punkte, was die Projektion lichteffizienter macht und die benötigte Laserleistung reduziert. Zudem liefert das Lasermodul Output in einem sehr schmalen Wellenlängenbereich. Dies erleichtert die Unterscheidung der Punkte von der Umgebungsbeleuchtung. Für die Erkennung und Auswertung der Punkte wird eine zusätzliche Kamera am HMD angebracht, wie in Bild 12 dargestellt. Die Kamera erfasst die Punkte sehr weitwinkelig und in hoher Frequenz. Deren 2D-Position steht dann nach entsprechender Vorverarbeitung für die Trackingalgorithmen zur Verfügung. Ein Bandpassfilter vor dem Kameraobjektiv erleichtert die Unterscheidung der Punkte gegenüber Störlichtquellen. Die Algorithmen identifizieren einzelne Punkte über deren Position relativ zueinander und berechnen daraus die Kamerapose.

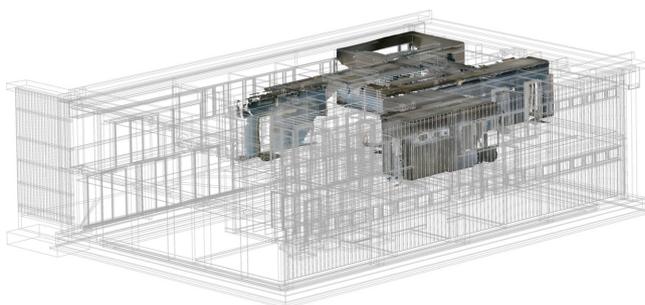
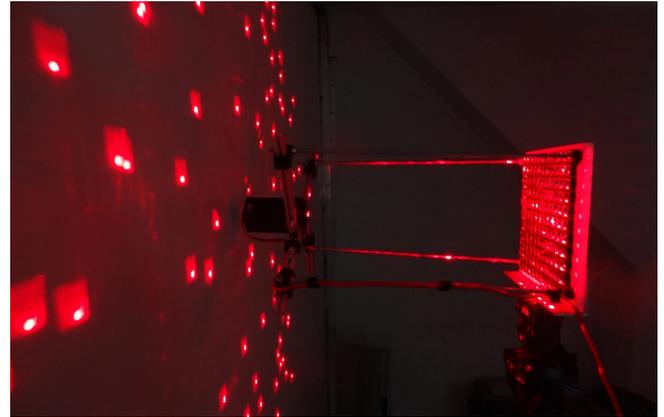




Bild 12. Laserprojektor mit aus kurzer Entfernung auf die Wand projiziertem Punktmuster (links), AR-HMD mit zusätzlicher Kamera für die Erfassung der Punkte (rechts) *Abb.: Schönauer*
 Fig. 12. Laser projector with a dot pattern projected from a short distance on the wall (left), AR-HMD with additional camera for capturing the points (right)
 Source: Schönauer



McIllroy [20] demonstrierte die Funktionsweise dieses Ansatzes in sehr kleinem Maßstab. Durch spezialisierte, sehr kostengünstige Projektorhardware und verbesserte Softwarealgorithmen wollen die Autoren mit ihrem Ansatz eine kleinere Anzahl von eindeutigen Features auf eine große Fläche projizieren. Das ermöglicht effizienteres Tracking in größeren Bereichen.

Der Ansatz befindet sich in einem frühen Prototypenstadium. Erste Laboregebnisse lieferten eine erfolgversprechende durchschnittliche Genauigkeit von circa 2 cm beziehungsweise einem Grad [21].

4.2 Korrektur des Drifts durch BIM-Modelldaten

Das zweite vorgestellte Trackingsystem nutzt im Gegensatz zu derzeit üblichen Ansätzen den Vorteil des BIM-Modells, das bereits präzise Informationen über die 3D-Umgebung enthält. Durch eine entsprechende Erweiterung des SLAM-Algorithmus sollen beim Mapping Informationen aus dem BIM-Modell mit den Daten von RGB- und Tiefenbildkameras abgeglichen und so die absolute Genauigkeit der Trackingdaten verbessert werden. Dies verhindert den Drift des Trackings in weiträumigen Bereichen, indem die Fehlerakkumulation durch regelmäßige Anpassung reduziert wird. Sind im Nahbereich der Sensoren geometrische Strukturen vorhanden, können neben den visuellen Features die Tiefenbilddaten verwendet werden, wobei die Geometrie des BIM-Modells als Bezug dient.

Die Methode zur Korrektur des Drifts in der SLAM-Position nutzt den Umstand, dass künstliche Strukturen, wie sie im Baustellenumfeld auftreten, einen großen Anteil an einfachen geometrischen Grundformen besitzen. Viele dieser Grundformen sind planar und entweder parallel oder orthogonal zueinander. Essentieller Bestandteil der Methode ist daher ein effizienter Algorithmus zur Extraktion von Ebenen, der auf die rekonstruierte 3D-Geometrie angewendet werden kann. Verschiedene Implementierungen von Algorithmen zur Extraktion von Ebenen sind verfügbar und können integriert sowie evaluiert werden. **Bild 13** zeigt die Visualisierung der erkannten und annotierten Ebenen (Wall, Floor) in der AR-Brille basierend auf dem rekonstruierten Modell der Szene. Die Zuordnung von Ebenen im BIM-Modell und den aktuellen Sensordaten kann im Normalfall relativ trivial aus der SLAM-Position und dem BIM-Modell abgeleitet werden.

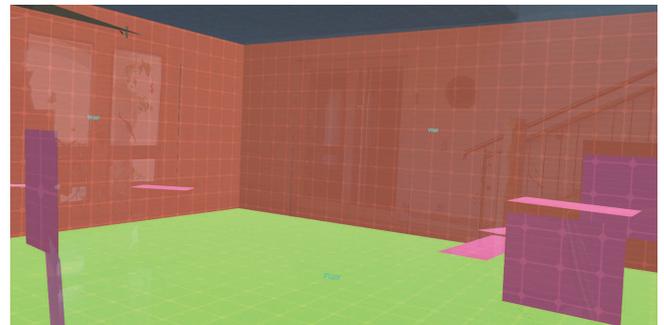


Bild 13. Visualisierung von erkannten Ebenen mit Annotation in der AR-Brille *Abb.: Schönauer*
 Fig. 13. Visualization of recognized levels with annotation in AR glasses
 Source: Schönauer

Im Falle eines strukturellen Fehlers (z.B. Fehlen einer Wand) wird die zugehörige Ebene für die Optimierung ignoriert.

Für die Optimierung der Position kategorisieren die Autoren die Ebenen zunächst als horizontal oder vertikal und nach Parallelität. Damit nutzt die entwickelte Methode die überwiegend orthogonale Struktur von Innenräumen und kann neben den Parametern der Ebenen selbst die Struktur als Constraints in der folgenden Optimierung nutzen. Dieser Ansatz liefert dadurch mehr und bessere Constraints als die linienbasierten Constraints [22]. Daraus kann ein nichtlineares Problem kleinster Quadrate formuliert werden (Fehleroptimierung), welches mit einer geeigneten Methode (z.B. Levenberg-Marquadt) gelöst werden kann. Das Resultat dieser Methode ist schließlich die optimierte und driftfreie Position in sechs Freiheitsgraden. Erste Experimente mit der Methode zeigten in Labortests erfolgversprechende Ergebnisse.

5 Fazit

Dem Einsatz von Augmented Reality wird im Bauwesen eine große Zukunft vorausgesagt. Diese Technology weist eine große Anzahl an möglichen Anwendungsfällen (Use-Cases) auf der Baustelle auf. Für einen produktiven Einsatz ist jedoch ein genaues Tracking des virtuellen Modells äußerst wichtig. Gerade auf der Baustelle ist dies durch äußere Bedingungen erschwert. Die Autoren beschäftigten sich in den Tests mit drei dieser Erschwer-

nisse: Belichtungssituation, Oberflächenbeschaffenheit und Vorhandensein von Erkennungspunkten (Features).

Die Tests der Autoren zeigten, dass einerseits die derzeit verwendete Trackingtechnologie sehr gut in Innenräume funktioniert, jedoch Probleme bei direkter Sonneneinstrahlung hat. Ein Lösungsvorschlag wäre die Verwendung eines anderen Wellenlängenbereichs im Infrarotspektrum. Andererseits neigen die derzeitigen Trackingsysteme zu einem erhöhten Drift bei einfarbigen Oberflächen (wie sie im Baustellenalltag häufig vorkommen: Betonoberflächen oder verputzte Oberflächen) und wenn wenig Features angetroffen werden. Für diese Situationen entwickelten die Autoren zwei Lösungsvarianten. Die erste Variante verwendet mittels Laserprojektion selbst erzeugte Features beziehungsweise eine Erhöhung der Anzahl der Features. In der zweiten Variante wird das BIM-Modell (insbesondere dessen Geometrie) herangezogen und mit dem realen Umfeld verglichen, um damit das Tracking immer wieder zu korrigieren. Beide Varianten zeigten vielversprechende Ergebnisse.

Die Autoren sind überzeugt, dass durch eine Verbesserung des Trackings die möglichen AR-Anwendungsfälle auf Baustellen (und nicht nur dort) massiv ansteigen werden. Beispielsweise wären somit teilautomatische Abnahmen und Baukontrollen möglich. Schon heute sehen viele Firmen in der Bauwirtschaft die möglichen Vorteile von AR-Systemen und setzen diese auf Pilotbaustellen ein. Der Einsatz wird sich in naher Zukunft weiter verstärken.

DANKSAGUNG

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

Literatur

- [1] *Changali, S.; Mohammad, M.; van Nieuwland, M.*: The construction productivity imperative. McKinsey & Company. 2015, <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/the-construction-productivity-imperative> [Zugriff am: 15.04.2020].
- [2] *Sanchez, A.; Hampson, K.; Vaux, S.*: Delivering Value with BIM: A Whole-of-Life Approach. Routledge, London, 2016.
- [3] *Azuma, R.*: A Survey of Augmented Reality. In: Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 6 (1997), Iss. 4, pp. 355-385.
- [4] *Milgram, P.; Kishino, F.*: A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. In: IEICE Trans. Information Systems, Vol. E77-D (1994), Iss. 12, pp. 1321-1329.
- [5] *Niedermair, S.*: Augmented Reality on Mobile Devices for Architectural Visualization. TU Wien, Diplomarbeit, 2012.
- [6] *Meza, S.; Turk, Z.; Dolenc, M.*: Measuring the potential of augmented reality in civil engineering. In: Advances in Engineering Software, Vol. 90 (2015), Iss. 12, pp. 1-10.
- [7] *Kumeran, G.; Santhi, K.; Anand, P. M.*: Impact of Augmented Reality (AR) in Civil Engineering. In: Advanced Materials Research, Vol. 18-19 (2007), Iss. 1, pp. 63-68.
- [8] *Urban, H.; Schranz, Ch.; Gerger, A.*: BIM auf Baustellen mit Augmented Reality. In: bauaktuell 10 (2019), Heft 5, S. 192-196.
- [9] *Schranz, Ch.; Gerger, A.; Urban, H.*: Augmented Reality im Bauwesen: Teil 1 – Anwendungs- und Anforderungsanalyse. In: Bauingenieur 95 (2020), Heft 10, S. 379-388.
- [10] Doka GmbH: Doka AR-VR-App [Software]. Juli 2019, <https://www.doka.com/at/home/apps/augmented-reality-app/> [Zugriff am: 17.02.2020].
- [11] Schöck Bauteile GmbH: Schöck S-CONSTRUCT app [Software]. Februar 2020, <https://www.schoeck.de/de/s-construct/> [Zugriff am: 28.03.2020].
- [12] Gamma Technologies: Gamma AR app [Software]. Juli 2019, <https://gamma-ar.com/de/gamma-ar-german/> [Zugriff am: 09.03.2020].
- [13] *Schmalstieg, D.; Höllerer, T.*: Augmented Reality: Principles and Practice. Pearson Education, London, 2016.
- [14] *Irschik, T.; Urban, H.; Schranz, C.*: Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen von Augmented Reality im Bauprozess mit DAQRI-Smart-Glasses. Wien, Zentrum Digitaler Bauprozess, TU Wien, Forschungsbericht, 2020.
- [15] *Liu, H.; Jiang, R.; Hu, W. et al.*: Navigational Drift Analysis for Visual Odometry. In: Computing and Informatics, Vol. 33 (2014), Iss. 3, pp. 685-706.
- [16] *Wagner, D.*: Depth cameras for mobil AR: From Iphones to wearables and beyond. 2018, <https://daqri.com/blog/depth-cameras-for-mobile-ar/> [Zugriff am: 12.04.2020].
- [17] *Gerger, A.; Schranz, C.; Urban, H.*: Augmented-Reality-Use-Cases im Bauwesen: Potentiale und Anforderungen. Wien, Zentrum Digitaler Bauprozess, TU Wien, Forschungsbericht, 2019.
- [18] Daqri: Worksense – Tools for the digital workforce. 2019, <https://daqri.com/worksense/> [Zugriff am: 12.04.2020].
- [19] ÖVE/ÖNORM EN 60825-1: Sicherheit von Lasereinrichtungen – Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen (IEC 60825-1:2014. Deutsche Fassung, Ausgabe August 2015.
- [20] *McIlroy, P.; Izadi, S.; Fitzgibbon, A.*: Kinextrack: 3D pose estimation using a projected dense dot pattern. In: IEEE transactions on visualization and computer graphics, Vol. 20 (2014), Iss. 6, pp. 839-851.
- [21] *Krier, A.*: Laser Projection Tracking. TU Wien, Diplomarbeit, 2020.
- [22] *Acharya, D.; Ramezani, M.; Khoshelham, K. et al.*: BIM-Tracker: A model-based visual tracking approach for indoor localization using a 3D building model. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 150 (2019), Iss. 2, pp. 157-171.



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

harald.urban@tuwien.ac.at

Abb.: Robert Rainer

Thomas Irschik, B.Sc.

thomas.irschik@tuwien.ac.at

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

christian.schranz@tuwien.ac.at

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

Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Schönauer

christian.schoenauer@tuwien.ac.at
Technische Universität Wien, FB Computer Graphics
Favoritenstraße 9-11/193-02, 1040 Wien, Österreich