

## FELDTTEST DER AUGMENTED REALITY LICHTMARKER-TECHNOLOGIE

I. Doll<sup>1</sup>, S. Ritterbusch<sup>2,3</sup>, P. von Both<sup>1</sup> und V. Koch<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Germany, <sup>2</sup>iXpoint Informationssysteme, Ettlingen, Germany, <sup>3</sup>VWA Hochschule, Stuttgart, Germany

### KURZFASSUNG

Augmented Reality (AR) eröffnet durch die Ergänzung der Realität um virtuelle Inhalte in Echtzeit auf handelsüblichen Smartphones im Bauwesen vielfältige Potenziale zur visuellen Unterstützung des digitalen Planungs- und Bauprozesses. Im Bauwesen besonders relevant sind passgenaue, realmaßstäbliche Abbildungen in Außenraumszenarien, die vor Ort anschaulich Planungsinhalte an Projektbeteiligte und Interessensgruppen vermitteln und frühzeitig Baumängel während des Bauprozesses sichtbar machen können. Eine Lichtmarker-Technologie, welche derzeit im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt wird, soll die erforderliche Positionsgenauigkeit in sehr unterschiedlichen Lichtverhältnissen bei geringem Installationsaufwand unter Nutzung von handelsüblichen Smartphones erreichen und die AR-Technologie für das Bauwesen im Außenraum professionell einsetzbar machen. Dieser Beitrag gibt einen Einblick in die Hintergründe der AR Lichtmarker-Technologie und stellt den Versuchsablauf und die Ergebnisse des ersten Feldtests vor.

### ABSTRACT

Augmented reality (AR) opens up a wealth of potential for visually supporting the digital design and construction process in the construction industry by adding real-time virtual content to camera recordings of commercial smartphones. Particularly relevant in the construction sector are accurate, true-to-scale figures in outdoor scenarios, which provide an easily interpreted graphic image of planning information to project participants and interest groups on-site and make construction faults visible at an early stage during the construction process. A light marker technology, which is currently being developed as part of a research project, should achieve the required positional accuracy in very different lighting conditions with low installation effort using commercially available smartphones and make professional use of the AR technology for outdoor construction. This article gives an insight

into the background of the AR light marker technology and introduces the test procedure and the results of the first field test.

### EINLEITUNG

#### Problemstellung im Bauwesen

Das Bauen befindet sich in einem Spannungsfeld zwischen Projektabwicklung und öffentlichem Interesse. Stark in der öffentlichen Kritik stehende Bauprojekte, wie das prominente Beispiel Stuttgart 21, zeigen, dass sowohl formelle als auch informelle Öffentlichkeitsbeteiligungsverfahren ein bedeutender Bestandteil bei der Planung und Umsetzung von großen Baumaßnahmen sein müssen. Denn der Erfolg eines Bauprojektes ist maßgeblich abhängig von der öffentlichen Akzeptanz. Sie kann gesteigert werden, wenn durch die Beteiligung betroffener Interessensgruppen eine Identifikation mit dem Projekt herbeigeführt werden kann (Anders et al., 2013). Eine Studie im Auftrag des Zentralen Immobilien Ausschusses e.V. bekräftigt die Relevanz des Themas, nach welcher der Hauptteil der befragten Bürger wünschen, ihr eigenes Lebensumfeld mitzugestalten und auch bereit sind, sich einzubringen (Articus, 2013). Bestehende Verfahren haben jedoch häufig nur einen informierenden Charakter und versuchen Bauvorhaben, die für Laien oft schwer zu begreifende Inhalte bergen, über kleinmaßstäbliche Modelle und definierte Blickwinkel in Visualisierungen zu kommunizieren. Dadurch kann nur begrenzt der Eindruck vom wirklichen Objekt vermittelt werden. Für eine Verbesserung der Laien-Kommunikation werden daher zukünftig einfach zugängliche und wirksame Methoden der Visualisierung von geplanten Bauprojekten erforderlich.

Daneben nimmt die Expertenkommunikation während des Planungs- und Bauprozesses und die Überwachung des Bauprozesses eine wichtige Rolle ein. Fehler in der Bauplanung, welche sich auf die technische Umsetzbarkeit oder auf die Nutzbarkeit nach Fertigstellung auswirken

und hohe Folgekosten nach sich ziehen können, werden durch mangelhafte Kommunikationsweisen von Problemstellen in der Planung zwischen den Planungsbeteiligten begünstigt. Die gebräuchlichen zeichnerischen Darstellungsmittel im Bauwesen können komplexe Zusammenhänge nur begrenzt anschaulich vermitteln. Weiterhin bedarf es während der Durchführung von Baumaßnahmen einer regelmäßigen Überwachung des Baufortschritts und einen Soll-Ist-Abgleich des Bauzustandes unterschiedlicher Gewerke, um Fehlstellen frühzeitig zu erkennen. Bereits bei Neubauvorhaben von Ein- und Zweifamilienhäusern treten gemäß einer Studie des Institutes für Bauforschung e.V. (IFB) und dem Bauherren-Schutzbund e.V. (BSB) im Durchschnitt circa 20 Baumängel je Vorhaben auf (IFB et al., 2015). Die Kontrolle mittels gebräuchlichen Kontrollwerkzeugen, wie Laserentfernungsmessgeräte, nehmen viel Zeit in Anspruch, sodass bei der Vielzahl an potenziellen Mängeln Fehler häufig zu spät erkannt werden. Vor diesem Hintergrund wird in der Projektentwicklung eines Bauvorhabens ein Kommunikationsmittel zwischen den Planungsbeteiligten zur anschaulicheren Darstellung von anspruchsvollen Planungsinhalten benötigt und andererseits ein neues Kontrollinstrument, das die frühzeitige Erkennung von Fehlstellen bei der Bauausführung vereinfacht.

### **AR als Mittel der Problemlösung**

Augmented Reality (AR) eignet sich dazu, die Defizite in der visuellen Darstellung und der Unterstützung der Bauüberwachung bei den einleitend beschriebenen Szenarien auszugleichen. AR ist eine Visualisierungsform aus der Ich-Perspektive, bei welcher in einem kontinuierlichen Prozess eine Erweiterung der Realität um virtuelle Inhalte in Echtzeit abhängig vom Standpunkt des Betrachters stattfindet (vgl. Broll, 2013). Durch Entwicklungen im Bereich der Video See-Through-AR, die eine Überlagerung der Realität und Virtualität über die Aufnahme des Videobildes auf handelsüblichen Smartphones oder Tablets ermöglicht, ist AR bereits für ein breites Publikum ortsunabhängig verfügbar. Die Darstellung in Echtzeit aus der Ich-Perspektive und die Mobilität der Technik ermöglichen es sowohl Visualisierungen physisch erlebbar und interaktiv zu machen als auch komplexe Zusammenhänge in Planungen visuell zu veranschaulichen und Modelle zukünftiger Gebäude individuell am realen Baugrundstück

zu erkunden. Das so ermöglichte Eintauchen des Betrachters in die Szene fördert das Verstehen und Begreifen und kann somit zur einer merklichen Verkürzung der Informationsaufnahme führen (vgl. Stankowski, 1994). Dadurch kann ein konstruktiverer Diskurs zwischen Laien und Experten angestoßen werden, der zu einer fundierteren Entscheidungsfindung führen kann. Weiterhin können Fehlstellen während der Bauausführung durch die Überlagerung von realem Bauzustand und geplantem Zustand in einem virtuellen Gebäudemodell schneller ersichtlich und erkannt werden.

Für die maßstäblich und perspektivisch korrekte Überlagerung virtueller Geometrien mit der Kameraaufnahme ist die Bestimmung der Position und Orientierung des Blickpunktes des Betrachters erforderlich (Tracking). Mobile AR-Systeme nutzen meist GPS-basierte, sensorbasierte (des mobilen Endgerätes) und kamerabasierte (optische Verfahren) Tracking-Lösungen (vgl. Broll, 2013). Durch die hohe Genauigkeit und Flexibilität von optischen Verfahren werden sie immer häufiger eingesetzt. Dabei helfen passive (nicht selbstleuchtende) oder aktive (selbstleuchtende) Marker, die Berechnungskomplexität und Fehleranfälligkeiten beim Tracking zu verringern. Passive Marker sind häufig auf Papier gedruckte Schwarzweißmarker und werden daher eher in kleinmaßstäblichen Szenarien eingesetzt. Aktive Marker können, insbesondere im Außenraum, zuverlässiger detektiert werden (Grimm et al., 2013). Derzeitige aktive Markersysteme sind jedoch bei Außenraumszenarien durch die natürlichen Einflüsse in ihrer Verwendbarkeit eingeschränkt. Deshalb bedarf es der Entwicklung einer robusten Lösung in Bezug auf die Umgebungsbedingungen.

### **Lichtmarker-Technologie als Lösungsansatz**

Ein Lösungsansatz für den professionellen Einsatz von AR mit aktiven Markern in Außenraumszenarien der Öffentlichkeitsbeteiligung, der Planungskommunikation und der Bauüberwachung im Bauwesen auf handelsüblichen Smartphones wird derzeit mit der Lichtmarker-Technologie im Rahmen eines Kooperationsprojektes zwischen einem Industriepartner und einer Hochschuleinrichtung erarbeitet. Die wissenschaftliche Forschung erarbeitet mathematische Grundlagen für die AR und architektonische Grundlagen für die Visualisierung von Gebäuden und deren Verfolgung des Bauzustan-

des. Die technische Forschung umfasst die Entwicklung eines aktiven Markers (Lichtmarker) und der zugehörigen Bediensoftware, womit eine eindeutige Detektion charakteristischer Punkte von künftigen Gebäuden ermöglicht werden soll. Dabei werden Punkte (digitale Lichtmarker-Referenzpunkte) am virtuellen 3D-Modell definiert, die der Position der Lichtmarker in der realen Szene entsprechen. Durch die Zuordnung der digitalen Lichtmarker-Referenzpunkte zu den erfassten Lichtmarkern in der Kameraaufnahme eines Smartphones kann das virtuelle Modell positions- und orientierungsgenau nach dem Blickwinkel des Betrachters dargestellt werden. Für die professionelle Nutzbarkeit in den genannten Szenarien werden hohe Anforderungen an die Lichtmarker-Technologie in Bezug auf die Genauigkeit der geometrischen Einpassung des virtuellen Gebäudemodells in die Kameraaufnahme des Smartphones, die eindeutige Erfassbarkeit der Lichtmarker bei unterschiedlichen Belichtungssituationen und die Erkennbarkeit aus mehreren Metern Entfernung gestellt.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sollen die Lichtmarker folgende Eigenschaften erhalten. Bestehend aus einer definierten Menge von dynamisch angesteuerten Hochleistungs-LEDs, soll die Erkennung der Marker im Außenraum an das jahres- und tageszeitlich schwankende Umgebungslicht optimiert werden. Die Abstrahlung soll die Erkennbarkeit der Lichtmarker aus mehreren Richtungen begünstigen. Eine Unterscheidbarkeit der einzelnen Lichtmarker soll durch Lichtsequenzen erreicht werden. Dadurch wird eine gute Bestimmung der Raumkoordinaten ermöglicht.

Aus der Anforderung, Gebäude sinnvoll in ihrer Umgebung im Zusammenhang zu virtuellen architektonischen Geometrien darzustellen, zielt das Projekt zunächst auf eine sichere Detektion der Marker auf bis zu einem Abstand von 100 Metern mit handelsüblichen Smartphone-Kameras mit HD-Auflösung bei Lichtverhältnissen zwischen Dämmerung und Mittagssonne. Daraus soll ermöglicht werden, unabhängig von den bestehenden Verhältnissen das Ziel der unkomplizierten, lebensnahen und interaktiven Darstellung virtueller Objekte im Zusammenhang mit der Realität zu erreichen.

Es folgen die Ergebnisse eines ersten Feldtestes der Lichtmarker-Technologie.

## FELDTEST

### Grundlagen

Das noch bis November 2018 andauernde Kooperationsprojekt sieht die Entwicklung der AR Lichtmarker-Technologie in zwei Phasen vor. Die Phasen schließen jeweils mit einem Feldtest ab. Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse des Feldtestes vom 23. November 2017 aus der abgeschlossenen Phase 1 vor. Testgegenstand waren die entwickelten Lichtmarker-Versuchsmuster, die mobile Software zur Erkennung und Verarbeitung der Lichtmarker und die Visualisierung von virtuellen Bauwerksmodellen auf einem handelsüblichen Smartphone. Der Feldtest aus Phase 1 zielte auf die Überprüfung der grundlegenden Funktionsfähigkeit der Lichtmarker-Technologie und auf die Erkennung von Optimierungspotenzialen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung eines Lichtmarker-Prototyps für Anwendungsfälle mit höchstem Genauigkeitsanspruch in Phase 2.

Der Feldtest verfolgte die Überprüfung der angestrebten technischen Leistungsfähigkeit der Lichtmarker-Versuchsmuster und der mobilen Software im Außenraum. In diesem Zusammenhang wurde die Erkennung der Lichtmarker-Versuchsmuster, die Dauer der Erfassung und die Unterscheidbarkeit einzelner Lichtmarker untersucht. Weiterhin sollte der Feldtest zur Überprüfung der Genauigkeit der Projektion virtueller Gebäudemodelle in der AR Szene dienen und den Einfluss des Standortes des Betrachters erfassen.

Als Versuchsort wurde ein Parkplatz nordöstlich eines größeren Hochschulgebäudes als fiktives Baugrundstück gewählt, der durch befestigte Flächen, Vegetationsflächen, Büsche und große Bäume gekennzeichnet ist. Der Feldtest fand am Nachmittag des 23. November 2017 von 13.00 Uhr bis 15.30 Uhr bei klarem Himmel und stellenweise Sonnenschein statt. Der Versuchsort befand sich im Schlagschattenbereich des südlich gelegenen Hochschulgebäudes.

Als virtuelle Testgebäudemodelle wurden das „FZK Haus“ des Institutes für Angewandte Information (IAI) am Karlsruher Institut für Technologie (IAI, 2017), einem einfachen Fantasiegebäudemodell eines Einfamilienhauses, und einer fiktiven Glasüberdachung über dem Nordzugang des Hochschulgebäudes gewählt. Für die Nutz-

barkeit in der AR Lichtmarker-Technologie müssen die Modelle, wie nachfolgend beschrieben, aufbereitet werden.

Zunächst ist anzuführen, dass zur Unterstützung eines BIM (Building Information Modeling) -basierten Planungsprozesses die Industry Foundation Classes (IFC) als Austauschformat der Gebäudemodelldaten zwischen der BIM-fähigen CAD-Software und der Lichtmarker-Software vorgesehen wurden. Als herstellernerutrales Datenformat stellen die ISO-zertifizierten IFC eine standardisierte Beschreibung sowohl geometrischer als auch semantischer Informationen bereit und ermöglichen die Integration der Gebäudeinformationen aus unterschiedlicher BIM-Software. Die im Projekt verwendete Software ist ARCHICAD 20. Der IFC-Export erfolgt hier über die Standardeinstellung des IFC-Übersetzers „Allgemeiner Übersetzer“, welcher das IFC-Schema Version 2x3 im Coordination View Version 2.0 ausgibt.

Für das Tracking und die Registrierung, dem korrekten geometrischen Einpassen, der virtuellen Testgebäudemodelle in der Kameraaufnahme des Smartphones müssen charakteristische Punkte am virtuellen Gebäudemodell definiert werden (digitale Lichtmarker-Referenzpunkte), welche der Position der Lichtmarker in der realen Szene entsprechen. Es werden mindestens vier nicht koplanare Punkte benötigt, um ein lokales Koordinatensystem zu definieren, welches die Position und Orientierung des Gebäudemodells im Raum verortet. Die digitalen Lichtmarker-Referenzpunkte müssen folgende Kriterien erfüllen, um sowohl zur Verwaltung in der CAD-Software als auch zur Übertragung und Weiterverarbeitung in der Lichtmarker-Software eingesetzt werden zu können: Verortung über einen kartesischen Punkt (X-, Y-, Z-Koordinaten), Vorhandensein einer geometrischen Repräsentation für die Verwaltung, optische Differenzierbarkeit durch Festlegung von Materialeigenschaften, Identifizierbarkeit durch ein alphanumerisches Namensattribut, Klassifizierbarkeit über die Zuweisung einer IFC-Entität und Export der geometrischen und semantischen Information nach IFC. Für den Test wurde das Objekt „GEPlatzmarkierung“ in ARCHICAD 20 verwendet, welches die obenstehenden Kriterien erfüllt. Die Zuordnung im IFC-Schema erfolgt zur Entität IFCFastener.

Im CAD-Programm wurde ein Vermesseralageplan zur Verortung und Ausrichtung der Modelle und der digitalen Lichtmarker-Referenzpunkte im realen Kontext hinterlegt. Der Vermesseralageplan enthält Höhenknoten des Geländes und Informationen über die geometrischen Abhängigkeiten des baulichen und vegetativen Bestands. Anhand dieser realen Orientierungsquellen können Maße entnommen werden, die zur Einmessung der Lichtmarker-Versuchsmuster am Versuchsort benötigt werden.

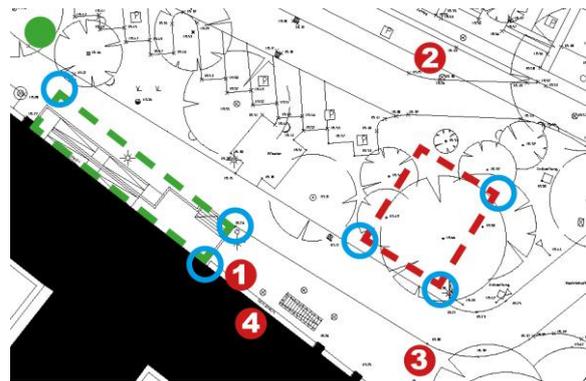


Abbildung 1: Vermesseralageplan mit Testgebäuden, Lichtmarkerpositionen (blau) und Teststandorten (rot: „FZK Haus“, grün: fiktive Glasüberdachung) (Planquelle: Vermögen und Bau Baden-Württemberg, Amt Karlsruhe)

Das „FZK Haus“ (IAI, 2017) misst eine Länge von 12.00 m, eine Breite von 10.00 m, eine Höhe von rund 6.50 m. Es hat ein Erdgeschoss, ein Obergeschoss und ein Satteldach. Das Gebäudemodell wurde am südöstlichen Rand des Parkplatzes auf einer mit Bäumen und Büschen versehenen Vegetationsfläche positioniert. Das Haus wurde giebelständig im rechten Winkel und mit einem Abstand von ca. 95 cm zu dem südwestlich verlaufenden Weg positioniert. Als weiterer Bezugspunkt dient eine Straßenlaterne am südlichen Gebäudeeck. Die Geländemarkierung der Straßenlaterne gibt eine Höhe von 115.36 m ü. NN. an, welche als Bezugshöhe für das Erdgeschoss des Testmodells und die digitalen Lichtmarker-Referenzpunkte festgelegt wurde. Die Referenzpunkte wurden jeweils am südlichen (Lichtmarker (LM) 1 und LM 2), am westlichen (LM 3) und am östlichen (LM 4) Eckpunkt des Testmodells etwa auf Augenhöhe (1.60 m ab Bezugshöhe 115.36 m ü. NN.) positioniert. Drei Punkte spannen eine Ebene auf (LM 2, 3 und 4), während der vierte Punkt (LM 1) am südlichen Ende außerhalb der Ebene in einer Höhe von 0.50 m ab Bezugshöhe liegt.



Abbildung 2: Screenshot Perspektive „FZK Haus“

Die fiktive Glasüberdachung über dem Nordzugang des Hochschulgebäudes besteht aus einem auskragenden, gefalteten Element als Glasdach und einer Stahltragkonstruktion, welches direkt an die Gebäudefassade anschließt. Es misst eine Länge von 22.50 m, eine Breite von 5.00 m und eine Konstruktionshöhe von insgesamt 0.58 m und überspannt den gesamten Eingangsbereich. Als realer Bezugspunkt wurde die südöstliche Ecke des Nordzugangs auf Niveau des davorliegenden Pflasterweges mit einer Höhe von 115.26 m ü. NN. gewählt. Der Abstand der Unterkante der Konstruktion zur Bezugshöhe beträgt 2.50 m. Die digitalen Lichtmarker-Referenzpunkte wurden jeweils am südöstlichen (Lichtmarker (LM) 1 und LM 2), am südlichen (LM 3) und am nordwestlichen (LM 4) Ende des Testmodells in Anhängigkeit von der Bestandsbebauung positioniert. LM 2, 3 und 4 spannen eine Ebene auf Augenhöhe auf (1.60 m ab Bezugshöhe 115.26 m ü. NN.); LM 1 liegt außerhalb der Ebene in einer Höhe von 0.50 m ab Bezugshöhe unterhalb LM 2.

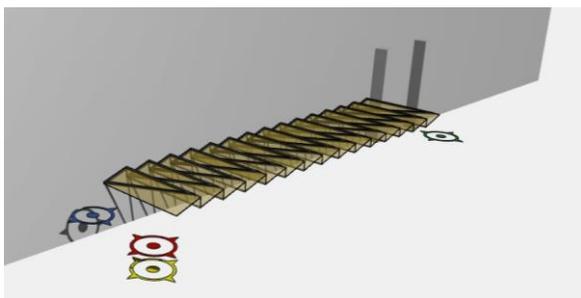


Abbildung 3: Screenshot Perspektive fiktive Glasüberdachung

Darüber hinaus wurden im Feldtest Lichtmarker-Versuchsmuster mit folgenden Eigenschaften eingesetzt. Die räumliche Dimensionierung der Versuchsmuster ist auf eine virtuelle Halbsphäre mit Radius von 6 cm ausgelegt, damit sie aus 110 m Entfernung mit einer Kamera mit Full-HD Auflösung und Field-of-View von 55° noch Pixeldimension erreichen. Da die Lichtmarker-Versuchsmuster für Lichtbedingungen im Außeneinsatz ausgelegt sind, muss eine äquivalen-

te Beleuchtungsstärke wie bei Mittagssonne von 100000 lux auf der Leuchtfläche erreicht werden können. Daher ist ein Lichtstrom von 2262 lm erforderlich. Es wurde angenommen, dass die nicht perfekte Reflektivität der Umgebung der Lichtmarker-Versuchsmuster, die entgegengesetzten Verluste durch den Diffusor der Versuchsmuster und die ungleichmäßige spektrale Verteilung des Sonnenlichts die Größenordnungen der Auslegung nicht grundsätzlich verändern. In der praktischen Umsetzung zeigte sich der abrufbare Lichtstrom von rechnerisch 2492 lm als ausreichend, um in der Mittagssonne sichtbar zu bleiben. Die kompakte LED-Technologie ermöglichte eine kleinere, quaderförmige Leuchtfläche innerhalb der virtuell als Halbsphäre angenommenen Leuchtfläche in der Auslegung. Die entstehende Abwärme bei Vollast kann vollständig durch passive Kühlung durch Kühlelemente abgeleitet werden. Die Spannungsversorgung wird mit Akkus im Lichtmarker realisiert.

Des Weiteren wurde folgendes Gerät für den Versuchsaufbau benötigt. Die Lichtmarker-Versuchsmuster wurden jeweils auf individuell einstellbaren Vermesserstativen aus Holz aufgestellt. Zur Befestigung der Versuchsmuster auf den Stativen wurde speziell eine Halterung aus MDF-Holzplatten konstruiert, die auf das Gewinde der Stative aufgeschraubt werden kann. Bandmaße und Meterstäbe wurden zur Einmessung der Versuchsmuster verwendet. Für die Erfassung der Versuchsmuster und Erzeugung der AR-Szene wurde ein iPhone 6s verwendet, welches auf einem Metall-Kamerastativ befestigt wurde. Die visuelle Dokumentation erfolgte zusätzlich mit der Kamera von weiteren iPhone 6s.

### Durchführung und Ergebnis: FZK Haus

Nach Einmessen und Aufstellen der Lichtmarker-Versuchsmuster an ihrer geplanten Position am Versuchsort wurde der Test an vier verschiedenen Standorten (Abb. 1), welche die Testszene aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachten, durchgeführt. Dabei wurde versucht, das Testobjekt möglichst in Totalaufnahme, das bedeutet ohne Schwenkbereiche der Kamera, abzubilden. Die Lichtmarker-Versuchsmuster sollten jeweils gleichzeitig von der Kamera des Smartphones, auf welchem der Test ausgeführt wurde, erfasst werden.



Abbildung 4: AR-Szene „FZK Haus“ von Standort 1

Standort 1 befand sich in etwa 13.75 m Entfernung zum nächstgelegenen Punkt des Testgebäudes. Die Szene wurde aus der Normalperspektive aufgenommen. Das Testobjekt konnte in der Totalen projiziert werden. Dadurch war weder ein horizontaler noch ein vertikaler Schwenkbereich der Aufnahmekamera erforderlich. Zwischen der Positionierung des Testgebäudes in der Kameraaufnahme und der geplanten Position ist eine Abweichung von bis zu etwa 1.00 m in südwestliche Richtung festzustellen. Die geometrische Einpassung des Testobjektes in die Szene wirkt realistisch. Durch die Verwendung von strukturierten Lichtsignalen statt großer passiver Marker haben die Lichtmarker sowohl eine vergleichsweise kleine Bauform, eine rundum Sichtbarkeit und eine Unterscheidbarkeit der einzelnen Marker durch leicht unterschiedliche Lichtsequenzen. Trotz der aktiven Lichtkomponenten sind die Lichtsignale nicht sehr störend, da sie eher als beleuchtete Flächen als Lichtquellen aufgefasst werden. Die Lichtmarker konnten von der sich in der Entwicklung befindlichen Detektionssoftware innerhalb weniger Perioden erfasst werden, und im Folgenden erfolgreich an veränderte Sichtpositionen angepasst werden. Die Erfassung zeigte Verbesserungspotentiale in der perspektivischen Verzerrungskorrektur im Bereich der rückwärtigen Wand, die nur von einem Marker festgelegt wurde, im Gegensatz zu drei Markern, die die vordere Wand definierten. Damit können die Abweichungen gut erklärt werden und in Zukunft durch bessere Anpassung angegangen werden.



Abbildung 5: AR-Szene „FZK Haus“ von Standort 2

Standort 2 näherte sich mit etwa 9.50 m Entfernung zum nächstgelegenen Punkt stärker an das Testgebäude an. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit jenen an Standort 1; die geometrische Einpassung erscheint noch genauer. Die Lichtmarker wurden nach wenigen Perioden individuell erfasst und das Gebäude entsprechend in das Bild eingepasst. Da hier nun drei Lichtmarker die rückwärtige Wand definieren und der Abstand etwas größer ist, tritt die Verzerrung schwächer auf und es ergibt sich eine genauere Darstellung.



Abbildung 6: AR-Szene „FZK Haus“ von Standort 3

Standort 3 maß etwa 7.60 m zum nächstgelegenen Punkt des Testgebäudes. Die Szene wurde aus der Normalperspektive aufgenommen. Das Testobjekt wurde in der Totalen projiziert. Zwischen der Positionierung des Testgebäudes in der Kameraaufnahme und der geplanten Position bestand eine geringe Abweichung von etwa 0.30 m in südwestliche Richtung. Die südliche Gebäudeecke wirkte ebenfalls etwa 0.30 m horizontal verschoben. Die geometrische Einpassung des Testobjektes in die Szene wirkte sehr realistisch. Die Detektion der Lichtmarker war durch Nähe dreier Marker schnell und robust. Die Genauigkeit kann aus der Abdeckung der nächsten und versteckten entferntesten Ecke des Gebäudes erklärt werden.



Abbildung 7: AR-Szene „FZK Haus“ von Standort 4

Standort 4 befand sich in einem Raum des Hochschulgebäudes im ersten Obergeschoss. Die Distanz vom Testobjekt wird auf etwa 14.00 m geschätzt. Die Aufnahme erfolgte in der Vogelperspektive. Das Testgebäude wurde in der Totalen im Kamerabild projiziert. Eine Abweichung von bis zu etwa 0.50 m zwischen der Positionierung im Kamerabild zur geplanten Position ist erkennbar. Die geometrische Einpassung wirkt sehr realistisch. Die Erkennung der Lichtmarker war erwartungsgemäß sehr robust, da der Boden als Hintergrund homogener wirkt und daher Lichtsignale sich besser davon abheben. Die bessere geometrische Situation, die Hauptebene der Lichtmarker gekippt statt frontal erkennen, führt auf eine bessere Berechnungssituation und lässt die genauere Detektion erwarten.

### Durchführung und Ergebnis: fiktive Glasüberdachung Zugang Hochschulgebäude

Der Versuch wurde von einem Standort in einem Abstand von etwa 9.00 m zum nächstgelegenen Punkt des Testobjektes in nordwestlicher Richtung durchgeführt. Die Lichtmarker-Versuchsmuster konnten gleichzeitig erfasst und das Testobjekt in der Totalen projiziert werden. Die Szene wurde aus der Normalperspektive aufgenommen. Aufgrund der Höhenlage des Testobjektes von etwa 2.50 m oberhalb der Geländeoberfläche wurde es in der Untersicht dargestellt. Während das Testobjekt in angemessener Höhe und vollständig an das Gebäude angebaut erschien, gab es in einer an der östlichen Ecke eine erhebliche Abweichung von etwa 4.50 m. Die geometrische Einpassung wirkte daher unrealistisch. Während die Erkennung der Marker schnell und genau erfolgte, so ist die Abweichung auf die zu geringe perspektivische Korrektur zurückzuführen: In diesem Fall ist das Verhältnis zwischen nächstem Punkt und entferntesten Punkt besonders groß und die Markerpositionen liegen außerhalb des Objekts.



Abbildung 8: AR-Szene fiktive Glasüberdachung

## FAZIT UND AUSBLICK

### Positionserfassung (Tracking)

Der Vergleich aller Testergebnisse zeigt eine inhomogene Genauigkeit der Positionserfassung. Während geringe bis mittlere Abweichungen der Positionierung der Testobjekte in den Planunterlagen von der Positionierung in der Kameraaufnahme beim „FZK Haus“ von maximal etwa 0.30 m bis etwa 1.00 m erzielt werden konnten, ist bei der fiktiven Glasüberdachung in einer Ecke eine erhebliche Abweichung von etwa 4.50 m erkennbar. Erwartungsgemäß erhöhen sich Abweichungen aus geometrischen Gründen von erkannten Positionen der Lichtmarker.

Ein Großteil der Abweichungen in diesem Testlauf sind aus Ungenauigkeiten der perspektivischen Korrektur zu erklären, die kleinere Abweichungen in den erkannten Positionen zu großen Positionsverschiebungen der Objektpositionen und Ausrichtungen führten. Die Abweichungen in den erkannten Positionen können durch Ungenauigkeiten in den Höhenkoten, in der Kennzeichnung der Außenanlagen und in der Lage der Straßenlaternen im vorliegenden Vermessungsplan in Bezug zum realen Bauzustand begünstigt worden sein. Weiterhin können Ungenauigkeiten beim Einmessen der Lichtmarker-Versuchsmuster von etwa 5 bis 10 cm in jeder Koordinatenachse entstanden sein.

### Geometrische Einpassung (Registrierung)

Die Auswertung der Testergebnisse zeigt hier ebenfalls eine Inhomogenität der geometrischen Einpassung der virtuellen Inhalte in die Kameraaufnahme. Während allgemein die grundsätzliche Funktion und Leistung der Technologie gezeigt werden konnte, wurden in Abhängigkeit zur Positionserfassung sehr realistische bis unrealistische Darstellungen der Testobjekte erzielt. Mit dem Testlauf konnten Fehlerquellen in der per-

spektivischen Korrektur identifiziert und in weiterer Entwicklung zur besseren Anpassung an die Kameraperspektive angegangen werden.

Für die Nutzung der AR Lichtmarker-Technologie in Planungs-, Ausführungs- und Simulationsszenarien soll in der weiteren Entwicklung eine höhere Genauigkeit in der Positionserfassung und geometrischen Einpassung erzielt werden. Der Maßstab hierfür sind die erlaubten Maßtoleranzen einzelner Gewerke, die für eine Erkennung von Baumängeln durch den Abgleich des Gebäudemodells mit dem realen Bauzustand erforderlich sind.

### Blickwinkel

Die Standorte wurden so gewählt, dass die Testmodelle in einer Totalaufnahme projiziert werden und die Kameraaufnahme möglichst aus der Normalperspektive heraus erfolgen konnte. Aufnahmen in der Totalen sind insbesondere für Anwendungsszenarien relevant, welche eine Erfassung der Gesamtzusammenhänge eines Bauwerkes und seiner Umgebung erfordern. Das können Augmented Reality-Szenarien der Öffentlichkeitsbeteiligung, wie die Beteiligung bei Projektinitiierung oder bei Baugesuchverfahren und des Stadtmarketings, wie die Darstellung des Historischen Bauzustandes oder von Kunst im städtischen Raum, sein. In Planungs-, Ausführungs- und Simulationsszenarien von baulichen Objekten sind jedoch insbesondere Teil- und Nahaufnahmen erforderlich, um Ausschnitte und Detailpunkte fokussieren zu können. Die AR Lichtmarker-Technologie wird daher im Laufe der weiteren Entwicklung eine Unterstützung für eine interaktive und explorative Nutzung erhalten.

### Lichtmarker

Für einen besseren Einsatz im Bauwesen werden sowohl weitere Befestigungsoptionen entwickelt als auch weitere Bauformen für Innenraumnutzung untersucht. Weiterhin werden Möglichkeiten für einen Betrieb vom Stromnetz evaluiert.

### Ausblick

Zukünftige Entwicklungen der Lichtmarker-Technologie im Bereich der Darstellung von statischen und dynamischen Daten aus Simulationsszenarien, wie energetische Gebäude- und Strömungssimulationen, Brandsimulationen oder

Tragwerksanalyse, könnten das Spektrum der anschaulichen Vermittlung an fachlichen Laien im Planungsprozess um die Kommunikation gebäudetechnischer, bauphysikalischer und tragkonstruktiver Planungsinhalte erweitern.

### DANKSAGUNG

Ein großer Dank geht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Unterstützung des Lichtmarker-Projektes im Rahmen des ZIM.



### LITERATUR

- Anders, S. et al. 2013. Werkzeuge. Visualisierung. In: Bott, H. et al. (Hrsg.). Nachhaltige Stadtplanung: Konzepte für nachhaltige Quartiere, München.
- Articus, S. 2013. Bürgerbeteiligung in der Stadtentwicklung. In: ZIA. Bürgerbeteiligung in der Projektentwicklung, Köln.
- Broll, W. 2013. Augmented Reality. In: Dörner, R. et al. (Hrsg.). Virtual und Augmented Reality, Heidelberg.
- Grimm, P. et al. 2013. VR-Eingabegeräte. In: Dörner, R. et al. (Hrsg.). Virtual und Augmented Reality, Heidelberg.
- Institut für Angewandte Information (IAI), Karlsruher Institut für Technologie 2017. FZK Haus – IFC4-Datei. In: [http://www.ifcwiki.org/index.php?title=KIT\\_IFI\\_Examples](http://www.ifcwiki.org/index.php?title=KIT_IFI_Examples). Aufgerufen am 08.03.2017.
- Institut für Bauforschung e.V. (IFB) 2015. Bauqualität beim Neubau von Ein- und Zweifamilienhäusern, Hannover.
- Stankowski, A. 1994. Visualisierung. In: Stankowski, A. et al. Visuelle Kommunikation. Ein Design-Handbuch, Berlin.