Automatisierte 4D-Bauablaufvisualisierung und Ist-Datenerfassung zur Planung und Steuerung von Bauprozessen

J. Teizer, J. Melzner, M. Wolf, O. Golovina, M. König

Zusammenfassung Die digitale Transformation der Bauindustrie ist bereits im Gange. Zwei wesentliche Bereiche in der Digitalisierung des Bauwesens sind das Internet der Dinge (engl. Internet of Things, IoT) und das in einigen Bauorganisationen bereits vielversprechend eingesetzte Building Information Modeling (BIM). BIM ist eine kooperative Arbeitsmethodik, mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht werden [1]. Durch die Verwendung digitaler Bauwerksdatenmodelle können Bauprozesse im Vorfeld sehr detailliert geplant werden. Mögliche Fehler werden damit frühzeitig

Ebene Anforderungen Stadt Unternehmen Anwendungs-felder Kunden- und Mobilität Industrie Gebäude Energie Dienstleistungen Dienstleistungen Anwendungs- Dienstleistungen Dienstleistungen der Dienste Domänenwissen lösungen Geschäftsprozesse Geschäftsprozesse (App Solutions) Aggregieren und Verknüpfen von Funktionen, Daten, Prozessen Plattform-**PLattformen** Management von Geräten und Systemen

Bild 1. Referenzarchitektur für Industrie 4.0 [2]

erkannt und bereits in der Planungsphase vermieden. Zu diesem Zweck wird die 4D-Bauablaufvisualisierung (oft fälschlicherweise als ,4D-Simulation' bezeichnet) eingesetzt, die auf Grundlage eines dreidimensionalen (3D) Bauwerkmodells und Terminplans (4D) bisher sehr aufwendig manuell verknüpft werden mussten.

Der Begriff IoT fällt häufig im Zusammenhang mit der zunehmenden Digitalisierung sämtlicher Industriezweige. Bereits seit 2012 arbeitet zum Beispiel die Akademie der Technischen Wissenschaften im Rahmen der nationalen Plattform Industrie 4.0 an der Standardisierung und Forschung in diesem Feld [2]. Die resultierende Referenzarchitektur (Bild 1) verdeutlicht den Zusammenhang zwischen den wesentlichen Komponenten einer smarten Industrie. Das Inter-

Ph. D. Dipl.-Ing. Jochen Teizer

jochen@teizer.de

RAPIDS Construction Safety and Technology Laboratory www.teizer.de

Dipl.-Ing. Olga Golovina

olga.mgsu@gmail.com

Prof. Dr.-Ing. Markus König

koenig@inf.bi.rub.de

Ruhr-Universität Bochum Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen

www.inf.rub.de

Dr.-Ing. Jürgen Melzner

juergen.melzner@markgraf-bau.de W. Markgraf GmbH & Co KG www.markgraf-bau.de

Mario Wolf, M.Sc.

mario.wolf@itm.rub.de Ruhr-Universität Bochum

Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik

www.itm.rub.de

net der Dinge (IoT) ermöglicht dabei neue Wertschöpfungsprozesse. Die Vernetzung von smarten Sensoren und Aktoren [3], tragbaren Geräten, sowie entsprechender leistungsfähiger Rechner- und Speicherressourcen in Cloud-basierten Plattformen bilden die Grundlage für Auswertungen, Automatisierungen und Optimierungen. Diese können als Dienstleistungen bedarfsgerecht von Kunden genutzt werden, um in der jeweiligen Industriesparte Mehrwerte zu generieren.

Da im Bauwesen besonders während der Bauausführungsphase nur sporadisch Ist-Daten gesammelt werden, ergeben sich enorme Chancen an, mobile digitale Endgeräte unterstützt durch in Echtzeit integrierte Lokalisations- und Sensordaten [4] zur Bildung neuer Geschäftsprozesse zu nutzen [5]. Diese würden die bisher nur unzureichend genutzten manuellen Datenerfassungs- und Datenauswertungsmethoden, zum Beispiel in der Baufortschrittsmeldung, erweitern.

Die vorgestellte Arbeit verfolgt zwei Ziele: Erstens, das Erstellen von automatisch generierten 4D-Bauablaufvisualisierungen unter Verwendung von Prozessmustern (Bild 2). Hierbei entsteht eine Verknüpfung zwischen den Objekten eines bereits vorhandenen 3D-Modells mit den Vorgängen im Terminplan. So lässt sich der Bauablauf visualisieren und auswerten [6]. Zweitens, durch die hohe Detaillierung in der Planung steigen jedoch auch die Anforderungen an das Termincontrolling. Um den Aufwand bei der Ist-Datenerfassung effektiver zu gestalten, werden in dem vorgestellten Ansatz mithilfe von Sensoren und mobilen Endgeräten die Baustelleninformationen in einer Cloud-Plattform erfasst, ausgewertet und dem Nutzer zur Verfügung gestellt. Neben dem Aspekt der Automatisierung ergibt sich durch Smart Device basierte Erfassung besonders auch eine höhere Resilienz gegen Erfassungsfehler, wie dies bei manuellen Zeiterfassungen schon lange beobachtet wird [7]. Die Erfüllung beider Ziele bringt allen am Bauprojekt Beteiligten über den gesamten Projektlebenszyklus und insbesondere während der Arbeitsvorbereitungs- und Ausführungsphasen deutlichen Mehrwert. Ein so erweitertes Bauwerksinformationsmodell bietet die einfache und permanente Verfügbarkeit von Bauprozessinformationen. Diese werden immer öfter zum wichtigsten Rohstoff, um

Jahresausgabe 2017/2018 VDI-Bautechnik Bauprojekte qualitativ hochwertig, termintreu und sicher abzuwickeln. Dabei spielen die theoretischen Grundkonzepte des Lean Construction Managements (LCM) ebenso wie die effiziente und risikoarme Planung und der effiziente Einsatz von Bauressourcen wesentliche Rollen. Bedingt durch fehlender oder unreifer intelligenter technischer Konzepte in der Ist-Datenerfassung und Datenauswertung können diese jedoch oftmals in der Praxis nicht effizient eingesetzt werden.

1 Einleitung

Bereits während den Planungs- und Ausführungsphasen eines Bauprojektes steht neuerdings der Begriff Lean Construction Management (LCM) für einen kontinuierlichen Prozess zur Beseitigung von Verschwendung, dem Erreichen der Kundenerwartungen, der Fokussierung auf die Wertschöpfungskette und dem Streben nach Perfektion [8]. Die Lean-Philosophie, die andere Industriezweige wie zum Beispiel den Automobilbau schon vor Jahrzehnten erfolgreich revolutioniert hat, ist mittlerweile auch in Deutschland ein integraler Ansatz zur Gestaltung und Planung von Prozessen in der Produktion, Logistik und Montage [9]. Ähnlich wie BIM, orientiert sich LCM dem Wertschöpfungsprozess, um den Wert von Daten und Informationen für alle Projektbeteiligte zu maximieren und die Verschwendung in allen Prozessen zu minimieren. Mithilfe von spezifischen Techniken und Werkzeugen, wie zum Beispiel dem Last Planer System (LPS) und der Taktplanung und Taktsteuerung (TPTS), wird Lean auf die Planung und Ausführung von Bauprojekten übertragen. Unter anderen spielen folgende Gesichtspunkte in BIM und LCM wichtige Rollen:

- Die Planung und ihre Ausführungsprozesse werden ganzheitlich betrachtet und pro-aktiv im Verbund aller Projektbeteiligten anhand Datenstrukturen koordiniert
- Um Werte zu schaffen und Verschwendung zu vermeiden, ist die Verbesserung der Gesamtleitung anstatt der Optimierung einzelner Arbeitsteilbereiche angestreht
- Prozesse werden durch möglichst offene Informationsplattformen vorausschauend gesteuert, um Varianzen in der Leistung der einzelnen Prozessschritte zu verringern und somit für einen stabilen und reibungslosen Produktionsfluss zu sorgen.
- Bauprojekte sind oftmals Einzelprojekte und machen aufgrund ihres sehr dynamischen Ablaufs und großen Datenmengen den Einsatz digitalisierter Prozesse und Methoden zwingend notwendig.

Aus diesen Gründen ist die Erstellung von 4D-Bauablaufvisualisierungen für die Unterstützung der Arbeitsvorbereitung und Logistikplanung von Bauprojekten ein beliebter Anwendungsfall der BIM- als auch der Lean-Methodik. In 4D-Bauablaufvisualisierungen werden die Objekte eines 5D-Modells mit den Vorgängen eines Terminplans verbunden und der Bauablauf über die Zeit visualisiert und ausgewertet. Zwar ist in der bisherigen Anwendung dieses Verfahrens einen vorhandener Terminplan vorausgesetzt, dieser muss jedoch bisher entweder manuell oder auch regelbasiert mit dem 3D-Modell verknüpft werden. Beides ist potenziell zeitaufwendig und fehleranfällig.

Die aktuelle Baupraxis zeigt auch, dass für die Überwachung einer Baustelle, die der detaillierten Planung Rechnung trägt, ein hoher personeller Aufwand und damit ver-

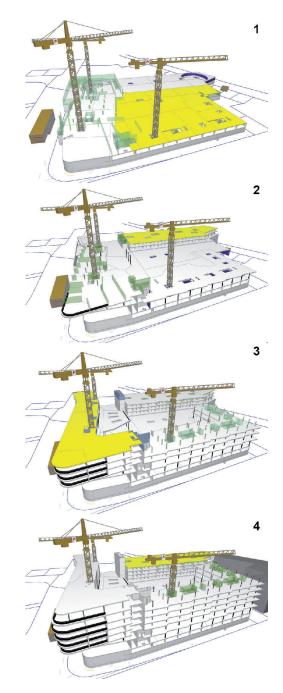


Bild 2. Zeitliche Abfolge eines Hochbauprojekts in einer 4D-Bauablaufvisiualisierung

bundene Kosten notwendig sind. Zudem sind die aktuell verwendeten Kontrollwerkzeuge trotz digitaler Unterstützung, zum Beispiel durch leistungsstarke Tablet-Computer auf Baustellen, auf manuelle Prozesse in der Datenaufnahme und Verarbeitung zurückzuführen. Für die Kommunikation der geplanten Tätigkeiten zwischen der Arbeitsvorbereitung und den ausführenden Gewerken werden mobile Endgeräte bisher kaum genutzt, obwohl die technische Infrastruktur hierfür auf fast allen Baustellen jetzt schon gegeben ist oder installiert werden kann.

2 Entwickelte Methode

Im vorliegenden Aufsatz wird eine neue Methode vorgestellt, mit der aus einem Bauwerkinformationsmodell auf Grundlage von Prozessbausteinen und der Bauwerksstruktur ein Terminplan automatisch erstellt werden kann. Dieser soll in seiner Struktur den praktischen Bauanforderungen entsprechen. Ein vorhandenes Gebäudeinformationsmodell liefert die notwendigen Informationen zu den Mengen und den topologischen Abhängigkeiten. Über vordefinierte Prozessbausteine wird der Terminplan automatisch in hoher Detailierung, zum Beispiel Raumweise im Ausbau, generiert (Bild 3).

Die generierten Arbeitspakete werden anschließend über eine Cloud-Plattform dem zuständigen Polier oder Arbeiter in einer mobilen, Smart Device basierten Applikation (nachfolgend 'App') zur Verfügung gestellt. Diese Personen haben über die App die Möglichkeit den aktuellen Fortschritt des Gewerks zu erfassen oder Störungen zu melden. Dabei muss der Arbeiter in der App nur gewerkespezifische Daten eintragen, da die Umgebungs- und Positionsdaten automatisch durch Bluetoooth Low Energy (BLE) basierte Beacons erfasst werden. Auch alternative Technologien, zum Beispiel optische oder elektromagnetische Verfahren erlauben das zeitgenaue Erfassen und Verwalten von Materialien und Arbeitsgeräten.

3 4D-Bauablaufvisualisierung durch die Verknüpfung von BIM und Terminplanung

3.1 Grundlagen

Bauwerksinformationsmodelle sind objektorientierte, mit zusätzlichen Informationen versehene digitale Abbilde eines Bauprojektes [10]. Eine Vielzahl von Anwendungsfällen kann den Planungs- und Bauprozess von Bauwerken modellbasiert unterstützen [11]. Ein populärer Anwendungsfall der BIM-Methode ist die Erstellung von 4D-Bauablaufvisualisierungen im Hochbau. Hierbei werden die Objekte eines Modells mit den Vorgängen aus einem vorhandenen Terminplan verknüpft. So lässt sich der Bauablauf über die Zeit visualisieren und auswerten.

Die Vorteile liegen im Wesentlichen in einer Verbesserung der Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten, insbesondere mit denjenigen Beteiligten, die nicht mit den Details der Terminplanung vertraut sind. Weiterhin helfen 4D-Bauablaufvisualisierungen die Sicherheit und Robustheit der Terminplanung zu verbessern, da in einer Animation des Bauablaufs Fehler leichter gefunden werden können als in der Vielzahl von Einzelvorgängen in einem Balkendiagramm

Der Aufwand für die Erstellung einer 4D-Bauablaufvisualisierung ist abhängig vom Umfang der zur Verfügung stehenden Attribute, der Objekte im Modell und der Gliederung der Modelldaten. Mehrwerte für eine modellbasierte Terminplanung liegen in der Abfrage der Mengen aus dem Modell, um die Vorgangsdauern zu berechnen. Bei einer integrierten Arbeitsweise wird das Modell nicht nur für das Bauprozessmanagement (BPM) erstellt, sondern auch für die Erstellung von Leistungsverzeichnissen und der Kalkulation von Bauleistungen. Es ergibt sich darüber hinaus der Vorteil einer einheitlichen Informationsbasis und der damit verbundenen Konsistenz der verwendeten Daten (Single Source of Truth). Unterschiede zwischen den Mengen, die der Terminplanung zugrunde liegen, und den Mengen, die für die Kalkulation verwendet werden, lassen sich so vermeiden.

Die in diesem Aufsatz vorgestellte Methode berücksichtigt die Anforderungen der Terminplanung und wird aus deren

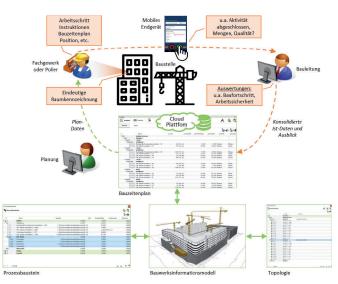


Bild 3. Methode zur Ermittlung der Soll-Planung und Ist-Datenerfassung [5]

Blickwinkel entwickelt. Das bedeutet, dass die Erstellung eines Leistungsverzeichnisses keine notwendige Voraussetzung ist, sondern die erforderlichen Mengen für die Berechnung der Vorgangsdauern direkt aus dem Modell entnommen werden.

3.2 Prozessbausteine und Bauwerkstruktur

Für die Erstellung eines Bauzeitenplans werden Mengen, Aufwandswerte und die eingesetzten Ressourcen benötigt. Zum Beispiel bedarf es für die Erstellung von Wänden aus Stahlbeton einen Aufwandswert für das Herstellen in einer bestimmten Qualität bezogen auf das Volumen der Bauteile und den eingesetzten Ressourcen, wie zum Beispiel der Kolonnenstärke. Die Aufwandswerte orientieren sich an Leitmengen für bestimmte Bauteile. Für das Herstellen von Wänden aus Ortbeton verwendet man üblicherweise als Leitmenge das Volumen. Bei Wänden aus Mauerwerk bezieht man den Aufwandswert in der Regel auf die Wandfläche

Die hier beschriebene Methode setzt auf die Mengen, die direkt aus dem Modell bestimmt werden. An diesen orientieren sich die Aufwandswerte. Die Arbeitsinhalte werden in sogenannten Prozessbausteinen zu Prozesspaketen zusammengestellt [12]. Hierfür werden die Prozessbausteine mit den 3D-Objekten eines Gebäudeinformationsmodells verknüpft. Die 3D-Objekte wiederum sind mit Knoten in der Bauwerksstruktur verankert, wobei jedes Bauteil in der hierarchischen Strukturierung des Gebäudes an einer bestimmten Stelle enthalten ist. Ein Prozessbaustein enthält im Wesentlichen folgende Informationen:

- Einen Namen
- Einen Aufwandswert in Stunden pro Mengeneinheit und Ressource
- Eine Formel zur Bestimmung der Leitmenge der entsprechenden Bauteile
- Abhängigkeiten zwischen den Prozessbausteinen
- Codierung zur Visualisierung der Aktivitäten

In der Bauwerkstruktur werden die Objekte eines Bauwerks hierarchisch nach Orten gegliedert. Um diese Topologie des Bauwerks zu definieren, werden die Objekte des Bauwerks mit den Elementen der Bauwerkstruktur verknüpft. Ein Element der Gebäudestruktur enthält:

- Einen Namen

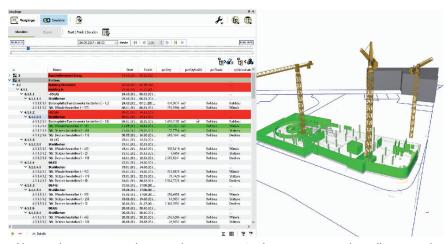


Bild 4. Visualisierung von einzelnen Bauteilgruppen eines Geschosses im automatisch erstellten Terminplan

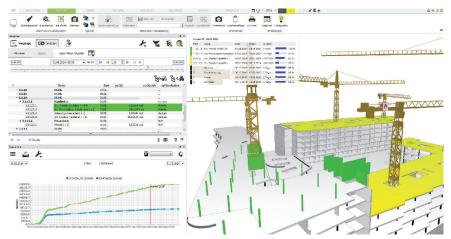


Bild 5. Termin- und Kostenkontrolle

- Materialinformationen
- Ausführungs- oder Ausstattungsdetails
- Zeitliche Beziehungen zu anderen Elementen der Bauwerkstruktur

Die Mengen werden direkt aus dem Modell abgeleitet. Bei der Berechnung der Dauern werden Nettomengen aus dem Modell betrachtet. Die Verwendung von Abrechnungs- oder VOB-gerechten Menge ist nicht zweckmäßig, da schon im Aufwandswert geschätzte Werte enthalten sind und die Aufwandswerte sich in der Regel auf die Nettomengen beziehen. Deshalb wird die Berechnung von Vorgangsdauern auf Grundlage von VOB-Mengen oder Abrechnungsmengen bewusst nicht durchgeführt. Für die Berechnung einer Leitmenge wird eine Formel hinterlegt. Die Formel legt fest, wie aus einem Bauteil des Modells die Leitmenge zu berechnen ist. Die Formel kann sowohl Attribute eines Bauteils als auch geometrische Eigenschaften eines Bauteils enthalten.

Die Detaillierungsstufe der Vorgänge im resultierenden Terminplan wählt der Terminplaner anhand von ihm vorgegebener Randbedingungen und seiner ingenieurmäßigen Einschätzung einer zweckmäßigen Abbildung der Aktivitäten. Der Terminplaner entscheidet, ob als Aktivität im Terminplan nur ein Vorgang für das Herstellen von Wänden enthalten ist, oder ob diese Aktivität in Teilaktivitäten, wie Einschalen, Bewehren, Betonieren usw. aufgegliedert werden muss.

Die Teilaktivitäten mit ihren Aufwandswerten und Abhängigkeiten werden zu Prozessbausteinen zusammengestellt.

Prozessbausteine werden in einer Datenbank gespeichert und können in weiteren Projekten wiederverwendet werden. Prozessbausteine für den Rohbau beziehen sich auf Bauteilebene.

3.3 Automatische Erstellung eines Terminplans

Der Terminplan wird mit den Prozessbausteinen und der Gebäudestruktur berechnet. Ein Prozessbaustein definiert die Arbeitsinhalte sowie Teilprozesse, die nötig sind, um ein bestimmtes Bauteil herzustellen. Weiterhin werden die Abhängigkeiten zwischen Teilprozessen festgelegt. Diese beschreiben die Beziehung zwischen Teilprozessen, die dasselbe Bauteil betreffen als auch Beziehungen zwischen Teilprozessen, die verschiedene Bauteile eines Bauwerkabschnitts betreffen. Weitere Abhängigkeiten werden zwischen den Abschnitten in der Bauwerkstruktur festgelegt. Diese werden durch Anordnungsbeziehungen beschrieben, die die Randbedingungen zwischen Start und Ende eines Vorgangs beinhalten sowie die Abstände zwischen den Teilprozessen. Ein Zeitpunkt in der 4D-Bauablaufvisualisierung inklusive der Start-End-Beziehungen ist in Bild 4 beispielhaft dargestellt.

Des Weiteren wird in Bauprojekten der aktuelle Baufortschritt gewöhnlich als Fertigstellungsgrad am Vorgang eingege-

ben. Das hilft den Beteiligten an einem Bauprojekt zu bestimmen, zu welchem Prozentsatz eine Tätigkeit abgeschlossen ist. Der in Bild 5 dargestellte Projektzeitpunkt erlaubt zudem noch ausstehende Aktivitäten, z.B. Ortbeton und notwendige Schalfläche, in Diagrammen zu visualisieren und dementsprechend zu steuern.

3.4. Ist-Datenerfassung und Auswertung

Mit Hilfe einfach zu installierender und nutzender IoT-Systeme können die notwendigen und bisher nur unter erheblichen Aufwand ermittelbaren Ist-Werte zum Baufortschrittsnachweis gesammelt werden [5]. Die sich ergebenden tatsächlich benötigten Arbeitszeiten für einzelne Aktivitäten (weitere Ist-Daten sind unter anderen auch Daten zu Qualitäts- und Mängelmanagement) lassen durch einen zeitnahen Vergleich mit den auf Erfahrungswerten-basierten geplanten Soll-Daten die sofortige Steuerung der verbleibenden Aktivitäten am Projekt zu. Dazu werden die erlangten Informationen aus den Ist-Daten in Projektbesprechungen verwendet. Mehrwert wird auch geschaffen in dem Planer im Nachgang eines Projekts die neu gesammelten Erfahrungswerte in der Akquisition neuer Projekte (u. a. durch Anpassen von Aufwandswerten in der Angebotsabgabe) einsetzen.

Anhand einer Pilotstudie mit freiwilligen Testpersonen (hier Arbeiter genannt) wird die Erprobung des in Bild 3 entwickelten Systems beschrieben. Die technische Umsetzung wurde mit BLE-Beacons auf Basis des Google Eddystone Protokolle realisiert, die jeweils einzeln an jeder der Arbeitsstationen installiert wurden [13]. Mittels Android-SmartPhones (und Tablets), die über BLE-Schnittstellen und Datenübertragungstechnik in die Cloud verfügen, wurde es vier Arbeitern ermöglicht die automatisierte Protokollierung des Baufortschrittes zu nutzen (Bild 6).

Zwar erlaubt die entwickelte Technologie bereits eine sekundengenaue Aufzeichnung und Übertragung der Daten in die Cloud, die raumbezogene Verknüpfung (Verortung) ist jedoch nur im Bereich der vorinstallierten BLE-Beacons an den Arbeitsstationen möglich (Bild 7). Sowohl das Ändern der Datenaufzeichnungsrate als auch weitere technische Einstellungsoptionen erlauben es wichtige arbeitsrechtliche Bedingungen zu erfüllen. So kann zum Beispiel die Technologie dahingehend eingesetzt werden, dass Arbeiter pro Raum einen automatisch erstellten Report erst nach manueller Bestätigung in der App absenden. Diese Reports können zudem automatisch und damit zeitnah in TPTS-Tafeln übertragen werden und damit den Projektteams in Lean-Besprechungen effizienter in der Projektkoordination helfen.

Aufgabe der Pilotstudie war es zunächst festzustellen, ob das entwickelte System aus automatisierter Technologie und Lean- und BIM-Methodik funktioniert. Nach erfolgreichen Tests in den Laboren der Ruhr-Universität Bochum wurde mittels

Cloud-basierten Datenauswertungsalgorithmen wichtige und zuvor nur schwer nachweisbare Information generiert. Darunter fielen unter anderen Gesichtspunkten: (1) die Echtzeit-Verknüpfung der Daten mit Bauwerkinformationsmodellen die dem aktuellen Bauzustand entsprachen (Ist-Modelle) (Bild 7) und (2) das Ermitteln des Zeitbedarfs einzelner Aktivitäten.

Die Darstellung in Bild 8 zeigt beispielhaft die Lernkurve von Arbeitern anhand der Montagezeiten von 18 identischen Produkten. Sie verdeutlicht die Effizienzsteigerung der Arbeiter bei der Montage der Produkte, wobei jedes Produkt auf die vier Arbeitsschritte spezialisierten Gewerke aufgeteilt und nur in der vorgegebenen, abgestimmten Reihenfolge zusammengebaut werden konnten. Waren zu Beginn noch mehr als 16 Minuten für den Zusammenbau eines Produkts notwendig, so waren es beim 9. Mal nur mehr knapp über fünf Minuten. Dies entspricht einer Zeitersparnis von knapp über 60 %. Dieser Vorteil lässt sich daraus erklären, dass die Arbeiter mit dem Produkt und den Produktionsschritten bisher nicht vertraut waren. Ähnliche Steigerungen bei bereits bekannten Montagen zu erwarten wäre wohl falsch, obgleich die Ist-Datensammlung und Auswertung bei sich wiederholenden Arbeitsschritten, wie sie im Innenausbau oftmals gefunden werden, gleichwohl Trends erstellen können, die das Baumanagement in der Entscheidungsfindung nutzen könnte.

Im weiteren Verlauf des Pilottests wurde die erste von zwei Pausen genutzt, um zu entscheiden wie der Produktionsverlauf optimiert werden könnte. Die zeitnahe Datenaus-



Bild 6. Technologische Umsetzung mittels BLE-Beacons und Smartphone-App

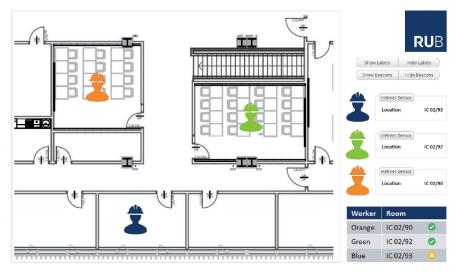


Bild 7. Screenshot des Softwareprototyps: Aufenthaltsort der Arbeiter in Echtzeit

wertung und Visualisierung in BIM wurde im Team der Arbeiter dazu genutzt den Ort des Materiallagers zu verlegen. Die Erwartungen an weitere Produktivitätssteigerung wurden erfüllt. Die Verlegung des Materiallagers minimierte die Laufwege (Transportzeiten) der Arbeiter (Bild 8, Vergleich Arbeitsstationen 7 und 12) und führte zu einer weiteren Verringerung der Produktionszeit von bis zu 6 %.

Da BIM bereits in der Evakuierung von Gebäuden vielversprechende Anwendungen der Planung von Trajektorien einsetzt [14], wurden adaptierte Verfahren entwickelt [15], um den optimalen Standort von Materiallagern zu berechnen. Somit können weitere Potenziale in der Logistik und Disposition von Materialen und Arbeitsgeräten in Zukunft von Echtzeit-Lösungen profitieren.

Darunter fallen auch für das Baumanagement sehr wichtige Anwendungen wie der Einfluss von Störungen auf den Produktionsfluss. Im besagten Fall wurden zwei den Arbeitern vorab unbekannte Störungen bewusst eingebaut: (1) Blockade des direkten Zugangs zur Station 16 (vorhandene Alternative musste genutzt werden) und (2) erschwerte Arbeitsbedingungen durch Abdunkelung des Arbeitsraums an Station 18. Interessant dabei ist, dass objektive Daten automatisiert gesammelt werden, die nach der konsistenten Erfassung und algorithmischen Auswertung weder Fehlinterpretation noch Manipulation zulassen. Weil im frühen Ablauf der Arbeiten zur Fertigstellung des 18. Produkts ein Fehler in einem Bauabschnitt begangen wurde, mussten alle an der Produktion beteiligten Gewerke Mehrarbeit leisten, um den Fehler zu beheben. Dies führte zu mehr als ei

Jahresausgabe 2017/2018 VDI-Bautechnik

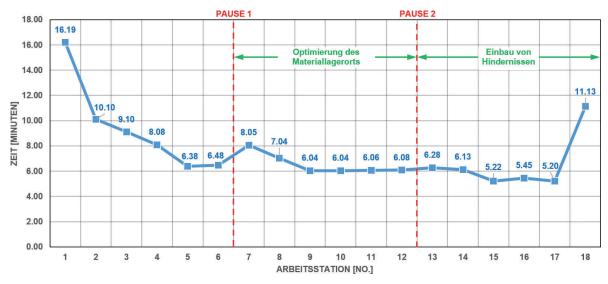


Bild 8. Lernkurve im Verlauf der Montage von identischen Produkten an 18 verschiedenen Arbeitsstationen

ner Verdopplung der bereits zuvor erzielten Bauzeit (Vergleich mit dem 17. Produkt).

In der abschließenden Auswertung des gesammelten Datensatzes wurden gewerkübergreifende Schlussfolgerungen erstellt. Es konnten Details zur Produktivität aller Arbeitsschritte ausgewertet werden. Dabei entfielen auf direkte Arbeitszeit (42 % der gesamten Arbeitszeit), Transportzeit (54 %) und Wartezeit (24 %).

Die geschilderten Resultate zeugen von den ersten Erfolgen der entwickelten Lean-IoT-BIM Plattform. Die mittels BLE und Smartphone generierten Ist-Daten, die automatisch in die Cloud-Managementplattform übermittelt und dort ausgewertet wurden, wurden mit manuellen Erhebungsdaten (in Papierform) validiert. Die automatisch generierten Reports weisen deutlich weniger Fehlstellen auf und können aufgrund der höheren Datenqualität in möglichen Projektbesprechungen zu besseren Lösungen führen.

4 Innovation und Wirtschaftlichkeit

Vorgestellt wurde eine Methode die einen Terminplan aus einem Bauwerkinformationsmodell automatisiert ableitet. Es wurden dazu einzelne Objekte im digitalen Modell mit ihren Eigenschaften, die Teilprozesse und ihre Abhängigkeiten sowie die Bauwerkstruktur eines Gebäudemodells berücksichtigt. Das Ziel hierbei war eine Unterstützung des Terminplaners bei der Erstellung der Struktur und des Inhalts eines Bauzeitenplans für Rohbau- und für Ausbauprozesse zu entwickeln.

Es sollten in der vorgestellten Methode die im Bauwesen üblichen Verfahren zur Erstellung eines Terminplans Anwendung finden, aber auch Gesichtspunkten des Lean Construction Management (LCM) berücksichtigt werden. Auf der Grundlage der Verknüpfung eines Bauwerkinformationsmodells mit Ist-Daten aus IoT-Systemen sollten eine einfachere und präzisere Auswertung für das Termincontrolling möglich sein. Dazu wurde in einer prototypischen App Ist-Daten über den aktuellen Status einzelner Arbeiter gesammelt. Mithilfe von mobilen Endgeräten auf Basis des Bluetooth Low Energy (BLE) Standard wurde die Daten auf eine Cloud-Plattform zurückgemeldet und dort anschließend analysiert.

Die hier vorgestellte Methode greift im Detail auf die technologischen Möglichkeiten der engmaschigen Vernetzung auf, um die bekannten Methoden und Systeme für das BIM mit IoT so zu erweitern, dass eine Verbesserung des Bauablaufs gegeben ist. Die vorgestellte Methode hat somit das Ziel erreicht durch eine (Teil-)Automation einzelne Prozesse des Lean Construction Managements (LCM) zu unterstützen.

In zukünftigen Studien müssen folgende akute Fragestellung der allgemeinen Bauwirtschaft adressiert werden:

- Welche Definitionen und Methoden existieren, um den Baufortschritt und Produktivität einzelner Arbeitsschritte zu messen?
- Wie können Soll- und Ist-Werte durch automatisierte Datenerhebungs- und objektiv-analytische Auswertungsmethoden dargestellt und an Anwender vermittelt werden?
- Welche baupraktischen Konsequenzen haben Innovationen auf Menschen und Bauverfahren?

Die Nutzung von BIM und IoT wird ständig durch Consultingfirmen und Marktforschungsinstitute überprüft. Gartner, McKinsey und die ExpertON Group beziffern allein das Marktpotenzial des Einsatzes von IoT-Technologien im Baubereich auf bis zu einer Billionen US Dollar in 2025 (u. a. [16], [17]). Damit übersteigt das Marktpotenzial im Bauwesen den Markt des Smart Home in den Prognosen um das Dreifache. Nach einer Studie von Forbes [18] sehen 90 % der Befragten große Potenziale für IoT-Anwendungen im Bauwesen.

Typische Anwendungsfelder, die den größten Gewinn versprechen und durch aktuelle Studien, wie die der vorgestellten Methode, immer wieder bestätigt werden, sind unter anderem:

- Verbesserung der Produktqualität
- Beschleunigung der operativen Prozesse
- Verringerung der Produktionskosten
- Verbesserung der Produktzuverlässigkeit

Bezogen auf das Bauwesen ergeben sich erhebliche Potenziale auf das Operations Management, die Gerätewartung (Groß- und Handgeräte), sowie den Bereich der Arbeitssicherheit. Typischerweise erkennen Anwender von Technologien neue Einsatzzwecke für Technologien schneller als die Entwickler selbst. Besonders in Bezug auf das Internet

VDI-Bautechnik Jahresausgabe 2017/2018

7

der Dinge und den angestrebten nahtlosen Übergang zwischen nicht-smarten Geräten hin zu IoT-fähigen Smart Devices ist die Innovation durch die Anwender getrieben. Es bedarf jedoch einer Bauindustrie die genauen Anforderungen zu bestimmen und von Entwicklern einzufordern oder mit zu entwickeln.

5 Fazit

Die hier beschriebene Methode ermöglicht erstmalig die automatisierte Erstellung eines Terminplans, der die Anforderungen und Randbedingungen der Baupraxis erfüllt und anschließend die Ist-Daten des Baufortschritts über eine IoT-Plattform erfasst und meldet. In der Entwicklung des Verfahrens gehören die Berücksichtigung der Gebäudestruktur, die Beschreibung der Teilprozesse (Arbeitsinhalte) und die Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen diesen Elementen. Das Ergebnis ist ein Bauablaufplan, der einem konventionell erstellten Terminplan in seiner Struktur und Detaillierungsgrad entspricht. Der Aufwand ist er-

heblich reduziert, da sich Bauteile mit Prozesskomponenten mittels weniger Arbeitsschritte verknüpfen lassen. Weiterhin können Prozesskomponenten, und somit Aufwandswerte, in Katalogen gespeichert und für ein neues Projekt wiederverwendet werden. Die gesammelte Ist-Daten wurden mit der entwickelten Technologie in BIM zur Verwendung des Projektmanagements erfolgreich eingesetzt.

Die vorgestellte Methode zur automatisierten Erstellung der 4D-Bauablaufvisualierung wurde in der Software DESITE MD der Firma ceapoint aec technologies GmbH [19] realisiert und anhand eines Bauprojekts der W. Markgraf GmbH & Co KG getestet [20]. Ceapoint vertreibt Software für BIM-Management und BIM-Koordination. Markgraf ist ein innovatives mittelständisches Bauunternehmen. Die Schnittstelle IoT-BIM wurde von der Ruhr-Universität Bochum in einer lehrstuhlübergreifenden Kollaboration [21] eigenständig entwickelt und unter anderem in einer Pilotstudie mit Handwerksbetrieben des deutschen Mittelstandes erprobt. Dabei haben die im DAAD-MIUR Joint Mobility Program teilnehmenden Austauschstudentinnen der Universita Degli Studi di Brescia (Chiara Minucchi und Valentina Marchetti) tatkräftig mitgeholfen.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Stufenplan Digitales Planen und Bauen: Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken, 2015.
- [2] Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, 2013.
- [3] Partynski, D.; Koo, S.G.: Integration of Smart Sensor Networks into Internet of Things: Challenges and Applications. In: IEEE International Conference on Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Internet of Things (iThings) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom), 2013, pp. 1162–1167.
- [4] Cheng, T.; Venugopal, M.; Teizer, J.; Vela, P. A.: Performance Evaluation of Ultra Wideband Technology for Construction Resource Location Tracking in Harsh Environments. In: Automation in Construction, Vol. 20 (2011), Iss. 8, pp. 1173–1184.
- [5] Teizer, J.; Wolf, M.; Golovina, O.; Perschewski, M.; Neges, M.; König, M.: Internet of Things (IoT) for Integrating Environmental and Localization Data in Building Information Modeling (BIM). In: 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Taipei, Taiwan, 2017.
- [6] Mikulakova, E.; König, M.; Tauscher, E.; Beuke, K.: Knowledge-based schedule generation and evaluation. In: Advanced Engineering Informatics, Vol. 24 (2010), Iss. 4, pp. 389–403.
- [7] Finkenzeller K.; Gebhart M.: Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. RFID-Handbuch, Hanser, München, 2015.
- [8] von Heyl, J.; Teizer, J.: Lean Production Controlling and Progress Tracking Using Digital Methods. In: Proceedings of the 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Heraklion, Greece, 2017, pp. 127–134.
- [9] Gehbauer, F.; Kirsch, J.: (2006). Lean Construction Produktivitätssteigerung durch "schlanke" Bauprozesse. In: Bauingenieur (2006), Heft 11, S. 504–509.

- [10] Borrmann, A.; König, M.; Koch; C.; Beetz, J. (Hrsg.): Building Information Modeling Technologische Grundlagen und industrielle Praxis.

 Springer-Vieweg, Heidelberg, 2015.
- [11] Melzner, J.; Teizer, J.; Zhang, S.; Bargstädt, H.-J.: Objektorientierte sicherheitstechnische Planung von Hochbauprojekten mit Hilfe von Bauwerksinformationsmodellen. *In*: Bauingenieur (2013), Heft 11, S. 471–479.
- [12] Hanff, J.; Melzner, J.: Modellbasiertes Bauprozessmanagement. In: Ernst & Sohn Special Building Information Modeling, Berlin, 2016.
- [13] Neges, M.; Wolf, M.; Propach, M.; Teizer, J.; Abramovici, M.: Improving Indoor Location Tracking Quality for Construction and Facility Management. In: 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Taipei, Taiwan, 2017.
- [14] *Rüppel, U.; Zwinger, U.; Kreger, M.*: BIM und Sensorik im Brandschutz. *In*: Building Information Modeling – Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Springer-Vieweg, Wiesbaden, 2015, S. 397–406.
- [15] Cheng, T.; Mantripragada, U.; Teizer, J.; Vela, P. A.: Automated Trajectory and Path Planning Analysis Based on Ultra Wideband Data. In: ASCE Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 26 (2012), Iss. 2, pp. 151–160.
- [16] Gartner: IoT Forecast. 2015, http://www.gartner.com/newsroom/ id/3165317. 2016-11-25.
- [17] Gartner: (2016) Gartner's 2016 Hype Cycle for Emerging Technologies Identifies Three Key Trends That Organizations Must Track to Gain Competitive Advantage. 2016, http://www.gartner.com/newsroom/ id/3412017, 2016-11-29.
- [18] Forbes: Internet Of Things (IOT), Big Data & Business Intelligence Update. 2016, http://www.forbes.com/sites/louiscolum bus/2016/10/02/2016-internet-of-things-iot-big-data-business-intelligence-update/#66b0272125aa, 2016-11-25.
- [19] ceapoint aec technologies GmbH: DESITE MD. 2017, http://www.ceapoint.com, 2017-07-12.
- [20] W. Markgraf GmbH & Co KG: http://www.markgraf-bau.de, 2017-07-12.
- [21] Ruhr-Universität Bochum: Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen. https://www.inf.bi.ruhr-uni-bochum.de, Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, http://www.itm.rub.de, 2017-07-19.

Jahresausgabe 2017/2018 VDI-Bautechnik