Neue Wege zur Integration von BIM, IoT und Lean Construction in der Bauingenieurausbildung

J. Teizer, J. Melzner

Zusammenfassung Während sich Building Information Modeling (BIM) und Lean Construction (LC) als moderne Methoden für die Planung, Steuerung und Kontrolle von Bauprojekten etabliert haben, so haben sich Internet of Things (IoT)-Anwendungen noch wenig in der Praxis durchgesetzt. Dabei besteht die Möglichkeit, Prozesse des Baustellencontrollings durch IoT in Echtzeit mit zu integrieren. Ein prominentes Beispiel ist, dass LC und damit verbundene Simulationsspiele in der akademischen oder beruflichen Ausbildung immer noch stark von manueller Dateneingabe und -analyse abhängen. Entscheidungen finden daher selten wissensbasiert noch zügig statt.

Es wird eine Lernplattform vorgestellt, die das Konzept der permanenten Verfügbarkeit von Echtzeit-Leistungsdaten unter Verwendung eines BIM-IoT-LC-Ansatzes aufgreift. Während die Plattform auf bestehenden cloudbasierten BIM-Tools und bekannten Taktplanungs- und Taktsteuerungsprinzipien aufbaut, wurde eine neuartige IoT-Plattform entwickelt, die den Teilnehmern das Sammeln und Umwandeln von Daten in Informationen während des Spielens in kürzester Zeit ermöglicht.

Die Plattform wurde in verschiedenen akademischen Lernumgebungen getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Teilnehmer den Einsatz der Technologie annehmen. Durch die Erweiterung eigener Erfahrungen aus traditionellen LC-Simulationsspielen mit BIM- und IoT-Komponenten konnten sie als Team noch enger interagieren und zusammenarbeiten. Der Zugriff auf Projektstatusinformationen in Echtzeit auf mobilen Endgeräten und großen Bildschirmen trug zur Verbesserung der erwarteten Projektdurchführungszeit bei, während Verschwendungsfaktoren deutlicher erkannt und reduziert wurden. Eine entdeckte Hürde ist die Integration der entwickelten Technologie in neue Lehrpläne, die auf die Digitalisierung des Bauens abzielen.

1 Einleitung

Automatisierung, Digitalisierung und Robotik werden die Bauprozesse in Zukunft maßgeblich beeinflussen. Drei der populären Beispiele mit Anwendungen im Bauwesen sind: Erstens, kollaborative Roboter (alias Cobots) und Bauarbeiter werden miteinander arbeiten, um die Montage von Materialien an Bauteilen zu unterstützen und im Weiteren zu optimieren. Zweitens, die Projektkoordination wird durch Wissen anstatt durch Daten oder informationsbasierten

Jochen Teizer, Ph.D., Dipl.-Ing.

Associate Professor, Aarhus University, Dänemark Civil and Architectural Engineering jochen@teizer.com

Prof. Dr.- Ing. Jürgen Melzner

Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen Röntgenring 8, 97070 Würzburg juergen.melzner@fhws.de

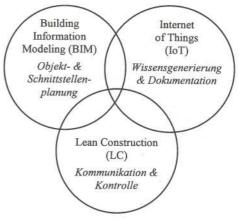


Bild 1. Integration von BIM-IoT-LC

Entscheidungen unterstützt. Drittens, intelligente Systeme helfen dem Menschen, vielfältige Risiken, die möglicherweise dann immer noch in der Mensch-Maschine-Interaktion vorhanden sind, präzise vorherzusagen und zu verhindern. Die meisten Organisationen weltweit sind jedoch immer noch mit Geschäftsprozessen konfrontiert, die weit vom Internet der Dinge (IoT) entfernt sind wie zum Beispiel die papierbasierte Kommunikation von Fax oder in jüngerer Zeit von E-Mail.

Während die Building Information Modeling (BIM) Methode die integrierte oder interdisziplinäre Bereitstellung von Projektinformationen unterstützen soll, besteht bei den meisten Bauvorhaben nur ein geringer Informationsaustausch zwischen der Bauplanung, der Bauausführung, und dem nachfolgendem Facility Management. Sobald Modelle für die Ausschreibung erstellt wurden und die Bauausführung beginnt, werden bisher in vielen Projekten die Modelldaten nicht mehr aktualisiert. Was für einen Zwischenschritt zu einer wissensbasierten Bauablaufplanung erforderlich ist, ist eine enge Integration von BIM für eine konsistente Objekt- und Schnittstellenplanung, IoT für eine zeitnahe, objektive und zuverlässige Datenerfassung, -analyse und -kommunikation und Lean Construction (LC) für die verschwendungsarme Projektdurchführung, kontinuierliche Projektbewertung und -steuerung (Bild 1).

Aus diesem und weiteren Gründen gerät Lean im Bauwesen immer mehr in den Fokus von wissenschaftlichen Untersuchungen und praktischen Anwendungen. Dabei ist Lean nicht neu und schon immer ein Grundprinzip des Baubetriebs. Koskela entwickelte bereits 1992 die Transformation-Flow-Value (TFV)-Theorie die besagt, dass das Bauwesen mit der Umwandlung von Ressourcen und der Schaffung von systematischem Wert beziehungsweise dem kontinuierlichen Fluss von Materialien und Menschen konzipiert werden kann [1], [2]. Seitdem haben sich für den Bausektor mehrere Lean Construction Theorien herausgebildet [3]. Obwohl sie sich letztendlich zu praktischen Methoden entwickelt haben, entstehen gerade Werkzeuge für eine effiziente (automatisierte) Datenerfassung auf Baustellen und

eine nahezu Echtzeitanalyse. Es sind daher Menschen, die Baustellendaten, zum Beispiel mit Tablets oder Handscannern, eingeben, die dann zum größten Teil isolierte Daten zu Informationen verarbeiten und diese möglicherweise mit Modellen verknüpfen. Der Mensch interpretiert anschließend die Ergebnisse erneut und bildet aus Informationen wertvolles Wissen, das schließlich in der kollaborativen Projektdurchführung angewendet wird.

Das vorgeschlagene Konzept sieht vor, dass das ordnungsgemäße Informationsmanagement für Bauprojekte unter allen Projektbeteiligten, von der Datengenerierung über die Verfügbarkeit von Informationen bis hin zum Austausch von Wissen, ein wesentlicher Schlüssel für die erfolgreiche Implementierung von Methoden zur Produktionsplanung und -kontrolle ist. Für das Baustellenmanagement und die Koordination der Gewerke sind koordinierte Arbeitspakete und ein konstanter Informationsfluss zur Beurteilung des Arbeitsfortschritts, der eventuell vorhandenen Einschränkungen und der daraus resultierenden Produktivität erforderlich, um fundierte Entscheidungen treffen zu können. In diesem Artikel wird kurz auf die Verwendung von BIM und IoT in Verbindung mit Lean-Construction-Ansätzen für den Hochbau eingegangen. Es wird ein Konzept vorgestellt, das BIM-IoT-LC in ein realistisches Lernspiel integriert. Darauf aufbauend wird die Anwendung im akademischen Umfeld implementiert. Die Ergebnisse werden bewertet und kritisch überprüft.

2 Hintergrund

Bekannte Beispiele für Verschwendung in Baustellenprozessen, die Verzögerungen im Projektablauf verursachen, sind: lange Wartezeiten; schlechte Qualität; unnötige Transporte; ungenutzte oder falsch genützte Flächen; schlecht organisierte Lagerung von Bauteilen oder Materialien; fehlende oder unmotivierte Personalressourcen und Verzögerungen durch behördliche Vorschriften. Durch die Anwendung von neuen Methoden und deren kombinierter Anwendung sollen die bekannten Probleme gelöst werden. Die Schulung der BIM-, IoT- und LC-Prinzipien sind von entscheidender Bedeutung, um Interesse und Motivation für die spätere Implementierung einer oder mehrerer dieser Methoden zu gewinnen.

2.1 Lean Construction und der Einsatz von BIM und IoT

Eine Grundannahme beim konventionellen Bauprojektmanagement ist, dass Aktivitäten, Aufgaben und Abhängigkeiten zwischen den Projektbeteiligten koordiniert werden können, wenn die erforderlichen Informationen gemeinsam genutzt werden. Während theoretisch der vorgesehene Projektzeitplan und das vorgesehene Budget eingehalten werden sollten, ist das Gegenteil zu oft der Fall [4]. Aus diesem Grund haben zahlreiche wissenschaftliche Studien und in jüngster Zeit auch praktische Umsetzungen nach Änderungen gesucht, um die Robustheit der Projektplanungsprozesse zu erhöhen. Das Fehlen von nahezu Echtzeitinformationen zur Entscheidungsfindung in der Bauplanung und -ausführung ist bislang ein entscheidendes Problem gewesen.

Einer der frühen vielversprechenden Ansätze bestand darin, die zuvor unabhängigen methodischen Ansätze BIM

Tabelle 1. Beispiele für Lean Construction Spiele und deren Zuordnung

Anwendung	BIM	loT	LC,
Lean-Simulationsspiele**	-6116		X
Leapcon [22]			×
RBL-PHP [17]	(X)	×	х
BIM-IoT-LC	(X)	X	X

- Adressierung einer oder mehrere der Lean-Prinzipier
- ** Es existieren zahlreiche Varianten, die in der Bauindustrie und Beratungsunternehmen eingesetzt werden (z. B. Hotelbausimulation, Modulbau, Vorfertigung)

und LC miteinander zu verknüpfen [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]. Andere Studien haben einen weiteren Schritt unternommen und damit begonnen, Technologie zur Harmonisierung von aussagekräftigen Datensätzen heranzuziehen, die bereits in jedem der drei Silos (BIM-IoT-LC) existieren oder erzeugt werden können [14], [15], [16], [17]. Sofern einer der einzelnen Ansätze erfolgreich ist, führt dies zu einer raschen Datenerfassung des Projektfortschritts, einer systematischen Analyse und Prognose für fundierte Entscheidungen sowie einer Kommunikation innerhalb des Projektteams.

2.2 Technologien für digitales Lean Construction

Eine entscheidende Komponente zur Digitalisierung des Lean Construction ist die Notwendigkeit, Bauarbeiter innerhalb von Gebäuden zu lokalisieren. Während in der Literatur eine Vielzahl von Arbeiten zum Thema "Indoor Location Tracking" – auch in Kombination mit BIM [18] – vorhanden sind, gibt es weitere Technologien wie Bluetooth Low Energy (BLE) [19] oder Ultra Wideband [20] zur Lokalisierung. Diese weisen immer noch hohe Standortfehler auf. Rein visuelle Verortungsverfahren, wie beispielweise durch Foto- oder Videogrammetrie, befinden sich noch in der Erforschung beziehungsweise Entwicklung.

Bar- oder QR-Codes [21] bieten alternative visuelle Ansätze für die aktive Erkennung (z.B. eine Person, die ein Etikett scannt). Letztere Technologien weisen jedoch zusätzliche Einschränkungen zum Beispiel durch Schmutz oder Staub im Baustellenumfeld auf. Während keine einzelne Technologie ohne technische oder ethische Nachteile auskommt, ist vielen Anwendern oftmals die Tauglichkeit in praktischen Anwendungen nicht bekannt.

2.3 Lean Construction in Bildung und Industrie

Die Neuerung dieses Ansatzes zielt darauf ab, die derzeit getrennten Prinzipien BIM, IoT und LC in Kombination zu erlernen. Vorgesehen ist eine praxisnahe Lernumgebung, die einer traditionellen Lehrmethode folgt (d.h. frontale Lehrvorlesungen unter Verwendung von Präsentationsfolien). Bis heute sind einige gut umgesetzte Ansätze in die Hochschulbildung und Beratung zum Unterrichten von Lean-Prinzipien eingeflossen (Tabelle 1). Viele von ihnen befassen sich jedoch nicht ausführlich oder überhaupt nicht mit der BIM-Methode oder IoT-Technologie. Möglicherweise waren diese Begriffe damals nicht definiert oder der Einsatz von Technologie stand nicht zur Verfügung. Während sie oft als Lean-Simulationsspiele bezeichnet werden, verfolgen sie eigentlich Ziele von "Serious Games", die einen ernsten Hintergrund haben.

3 Implementierung

Der folgende Abschnitt beschreibt die Implementierung des entwickelten BIM-IoT-LC Serious Games in einer realitätsnahen Lernumgebung. Da die Planung der Bauprozesse bereits mit BIM erfolgt ist (Bild 2), werden in diesem Artikel lediglich die Hardware, Software und die Bedienung der IoT-Komponenten ausführlicher erläutert. Der bestehende LC-Ansatz wird ebenfalls nicht näher erläutert.

3.1 Hardware

Die BIM-IoT-LC-Lernumgebung verwendet NFC-Lesegeräte (Near-Field-Communication, oftmals bereits in Smartphones oder Tablets vorhanden) und dementsprechende kostengünstige NFC-Tags, um die Teilneh-

mer des Serious Games (die jeweils ein Gewerk repräsentieren) an sechs Arbeitsstationen und einem Lager zu lokalisieren. Um dies zu erreichen, trägt jeder NFC-Tag einen eindeutigen, vorab bekannten numerischen Identifikationscode. Dieser ist mit der Nummer der Arbeitsstation eindeutig verknüpft. Der NFC-Tag wird in der entsprechenden Arbeitsstation leicht erreichbar platziert (hier: Arbeitstisch oder später zum Beispiel am Türrahmen oder in einem Lichtschalter). Auf eine präzisere Verortung (obwohl technisch möglich) wird in dieser Lernumgebung bewußt verzichtet.

Die in dieser Anwendung verwendeten Smartphones erfüllen drei Aufgaben im Spiel. Zum einen helfen sie in Zusammenarbeit mit den NFC-Tags, den aktuell belegten Arbeitsplatz des Gewerkes zu lokalisieren. Zweitens erfassen sie die erforderliche Zeit die notwendig ist, um eine Aufgabe an einer Arbeitsstation oder im Lager zu erledigen. Auch werden die Zeiten gemessen, die Bewegungen zwischen den Arbeitsstationen und dem Lager erfolgen. Im Lager befindet sich das gesamte Material für die Montage eines Produkts – in diesen Spiel ein LEGO-Bauteilsatz (Bild 3). Die letzte Aufgabe des Smartphones besteht darin, einem Server den Ort und die Zeit eines Gewerkes zu übermitteln.

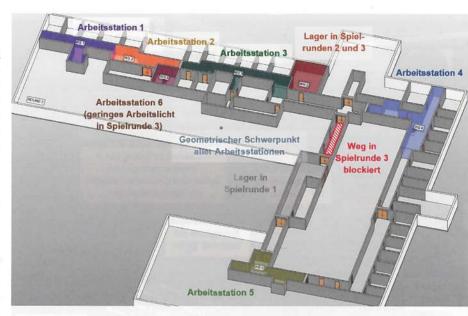


Bild 2. Gebäudeinformationsmodell der Testumgebung

Um die oben genannten Aufgaben zu erfüllen, benötigt das Smartphone einen NFC-Tag-Reader und eine robuste WLAN-Verbindung. Im Rahmen dieser Entwicklung benötigt das Smartphone auch ein Android-Betriebssystem für die entwickelte Anwendungssoftware.

Um die vom Smartphone gesammelten Daten an andere Geräte weiterzuleiten, ist ein Server erforderlich. Der Server speichert die erhaltenen Daten und verarbeitet sie automatisch. Die letzte benötigte Hardwarekomponente für das Spiel ist ein externes Anzeigegerät, das in der Lage ist, eine BIM-fähige Software auszuführen und mit dem zuvor genannten Server zu kommunizieren. Ein leistungsstarker Laptop, der zum Beispiel mit einen Beamer verbunden ist, dient als Anzeigewerkzeug. Diese Komponente ist erforderlich, um die von den anderen Komponenten des Spiels erhaltenen Informationen den Teilnehmern in Echtzeit anzuzeigen.

3.2 Software

Das Spiel verwendet drei Softwarekomponenten von denen die ersten beiden selbst entwickelt wurden:

Jedes Smartphone implementiert eine Android-Anwendung, die die Arbeitszeiten erfasst und die erhaltenen Infor-



Gewerk 3 im Lager

Bild 3. Spielsituation der BIM-IoT-LC-Lernumgebung in Runde 1



Gewerk 4 an Arbeitsstation 2

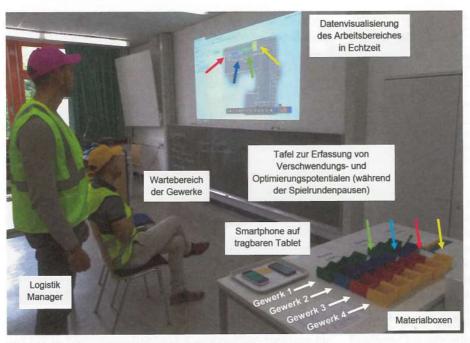


Bild 4. Spielsituation aus dem Lagerbereich in der dritten Spielrunde

mationen der NFC-Tags an den Server überträgt. Dazu wartet die Anwendung auf ein NFC-Tag-Signal. Wenn die Anwendung einen NFC-Tag erfasst, wird die Benutzeroberfläche grün. Die Farbe zeigt dem Teilnehmer an, ob ein NFC-Tag registriert wurde. Die Anwendung liest anschließend den Identifikationscode des NFC-Tags und sendet ihn durch eine HTML-Anfrage an den Server. Währenddessen speichert die Anwendung die Uhrzeit und die Nummer des Arbeitsplatzes, an dem der NFC-Tag registriert wurde. Solange das Smartphone auf dem NFC-Tag bleibt, zeigt die Anwendung einen grünen Bildschirm und die aktuelle Arbeitsstationsnummer an. Wird das Smartphone vom NFC-Tag abgehoben, registriert die Anwendung das NFC-Tag nicht mehr. Die Anwendung speichert dann die Zeit und sendet die Informationen an den Server. Schließlich wird der Bildschirm gelb, bis der nächste NFC-Tag gefunden wird. Dieser Vorgang wiederholt sich so oft, bis der Benutzer den gesamten Arbeitsprozess beendet hat.

Eine zweite Anwendung wurde entwickelt zum Empfangen, Speichern, Dekodieren, Verarbeiten und Senden der Informationen. Der Server sendet die Informationen nur auf Anfrage und nicht automatisch. Zu diesem Zweck setzt der Server mehrere PHP-Skripte ein.

Die dritte Anwendung hat die Aufgabe, die gesammelten Informationen in Autodesk Forge zu visualisieren. Forge bietet als kommerzielle Plattform mehrere cloudbasierte Entwicklungstools, mit denen Daten verarbeitet und in Echtzeit ohne den Einsatz zusätzlicher Software in einem Browser-Fenster visualisiert werden können. Die dekodierten Informationen werden von Forge angefordert. Es wird die vom Server empfangene Arbeitsstationsnummer übertragen und die aktuelle Position des Gewerks im Modell (Bild 2) innerhalb weniger Sekunden aktualisiert (Bild 4).

3.3 Ablauf

Ähnlich wie in der Arbeitsvorbereitung, werden vor dem Start des BIM-IoT-Lernspiels die Arbeitsstationen und -sequenzen in einem Bauwerksinformationsmodell (BIM) geplant. Die Arbeitsstationen werden innerhalb des Modells

Near-Field-Communication (NFC)-Tag-IDs verknüpft und vor Ort ausgestattet. Die praktische Anwendung startet mit der Platzierung aller Smartphones auf den ersten NFC-Tags im Lager. Dort holt jedes Gewerk die Materialien ab. In der Zwischenzeit erstellt die Smartphone-Anwendung ein Textdokument, in dem die aktuellen Zeit- und NFC-Tag-Informationen lokal gespeichert und an einen Server in eine Datenbank gesendet werden. Gleichzeitig sendet Forge in kurzen Abständen Anfragen an den Server, um die Informationen für jedes einzelne im Spiel aktive Gerät zu erhalten. Der Server decodiert die NFC-Tag-Informationen und übersetzt sie in eine Raumnummer, die dann an Forge zurückgesendet wird, um den Gewerkestandort in Echtzeit an einer Leinwand, einem großformatigem Bildschirm oder mobilen Endgerät zu ak-

tualisieren. Während das Spiel läuft, zeigt das Modell den gesamten Arbeitsbereich des Spiels an, einschließlich der Arbeitsstationen, des Lagers und der aktuellen Positionen der Gewerke. Damit ist es möglich deren Position visuell zu ermitteln und zum Beispiel festzustellen, ob sich diese entweder an einem Arbeitsplatz, im Lager oder auf den Weg befinden (Bild 2). Dementsprechend können wissensbasierte Entscheidungen zur sofortigen Verbesserung des Arbeitsablaufes nahezu in Echtzeit getroffen werden.

Das BIM-IoT-LC-Spiel besteht derzeit aus drei Spielrunden. Die Rohdaten werden von fehlerhaften oder duplizierten Dateneinträgen gefiltert und die resultierenden Informationen werden nach jeder Spielrunde mit den Gewerken besprochen. Ein typischer Satz von Informationen enthält den Standort (Arbeitsstationsnummer), die Gewerkenummer sowie die Zeiten für das Eintreffen und Verlassen des Lagers. Die resultierende Arbeitsdauer der Gewerke an den Arbeitsstationen, ihre Wege- und Wartezeiten im Lager werden automatisch in Diagrammen visualisiert. Vor allem die Vertreter der Gewerke und der Logistikleiter im Lager nutzen das neu verfügbare Wissen, um die Wegezeiten zu verkürzen (z.B. den Lagerort zu optimieren) und die Aufgaben- und Ressourcenverteilung zu verbessern (z.B. die Anzahl der Arbeitspakete zu harmonisieren). Diese Informationen werden schließlich in BIM aktualisiert. Anschließend wird eine neue Runde gespielt.

4 Vorläufige Ergebnisse

In Lean-Simulationsspielen werden in der Regel mehrere Runden gespielt, um die Auswirkungen der Einführung von Lean-Prinzipien anstelle traditioneller Arbeitsprinzipien zu demonstrieren. Während der Schwerpunkt der BIM-IoT-LC Lernumgebung auf dem Hinzufügen der BIM- und IoT-Komponenten liegt, werden im Folgenden hauptsächlich die Vorteile des Einsatzes von IoT hervorgehoben, die in den drei Spielrunden beobachtet wurden.

In Spielrunde 1 wurde es den Teilnehmern überlassen den Bauteilsatz eigenständig nach einer vom Hersteller vorge-

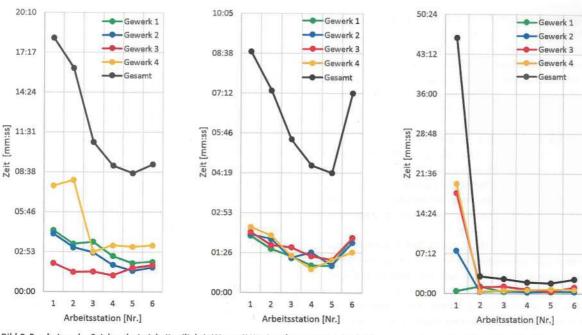


Bild 5. Ergebnisse der Spielrunde 1: Arbeits- (links), Wege- (Mitte) und Wartezeiten (rechts)

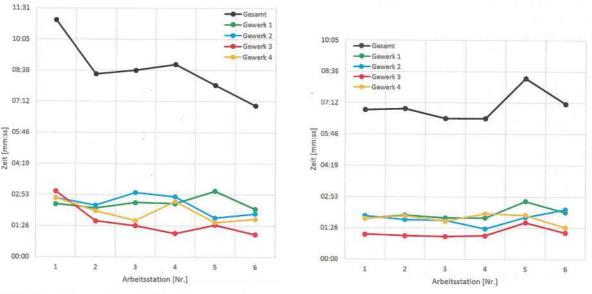


Bild 6. Arbeitszeiten aus den Spielrunden 2 (links) und 3 (rechts)

gebenen Abfolge zu vervollständigen. Die Aufteilung der Bauteile in Materialboxen wurde bereits jedem Gewerk zur Verfügung gestellt. Damit sind eventuell Lean-Optimierungspotentiale vorweggenommen. Jedoch wurden in Spielrunde 1 die Daten zur Position und Zeitpunkt der Gewerke an Arbeitsstationen und Lager mittels IoT bereits im Hintergrund aufgezeichnet. Folgende wesentliche Erkenntnisse konnten aus Spielrunde 1 gewonnen werden:

- Eine automatische Messung und Auswertung der Arbeits-, Wege- und Wartezeiten ist erfolgt. Gemäß den automatisierten Datensätzen benötigten alle Gewerke 59 Minuten und 41 Sekunden, um die erste Spielrunde abzuschließen. Vergleichbare manuelle Aufzeichnungen sind bis auf wenige Sekunden Unterschied nahezu identisch.
- Alle Produkte in der ersten Spielrunde wiesen Mängel auf. Diese können mittels einer mobilen App dokumentiert und an andere Gewerke zur sofortigen Behe-

bung kommuniziert werden. Die App erlaubt das Erstellen von ortsgebundenen Fotos innerhalb des BIM-Modells, die Auswahl vorgegebener Checklisten, die manuelle Eingabe von weiteren Notizen, die Zuweisung an Verantwortliche anderer Projektteilnehmer und die Übersicht der einzelnen Arbeitsschritte im modellbasierten Ablauf- und Zeitplan (u. a. Aufgabe erledigt oder in Bearbeitung).

- Die individuellen Arbeitszeiten, Wegezeiten und Wartezeiten werden verfügbar (Bild 5).
- Eine automatisch erzeugte Lernkurve ist visualisierbar (Bild 5, links). Die Gewerke benötigten unterschiedliche Zeiten, um ihre Arbeitsschritte durchzuführen. Dies hat eine Harmonisierung der Arbeitspakete und -ressourcen in der folgenden Spielrunde zur Folge.
- Die Wegezeiten der Gewerke sind nahezu gleich (Bild 5, Mitte).

- Die Wartezeiten der Gewerke im Lager sind sehr hoch (Bild 5, rechts).
- Während alle anderen Gewerke ihre Arbeitszeit zwischen Arbeitsstation 1 und 2 verkürzen, hatte Gewerk 4 an Arbeitsstation 2 ein nicht bekanntes Problem. Es verursachte eine nicht behebbare Verzögerung bis zum Beenden aller Arbeitspakete in Spielrunde 1 (Bilder 3 und 5).

Vor Beginn der Spielrunden 2 und 3 wurden die erlangten Erkenntnisse umgesetzt. Die entwickelte BIM-IoT-LC-Technologie zeichnete wiederum alle Daten auf und wertete diese aus. Ein wesentlicher Unterschied zur ersten Spielrunde war die Bereitstellung von Informationen in Echtzeit (u. a. Visualisierung) (Bild 4). Wesentliche Erkenntnisse sind (Bild 6):

- Durch die Verlegung des Lagers n\u00e4her an die Arbeitsstationen (siehe geometrischer Schwerpunkt der Arbeitsstationen, Bild 2) wurden die Wegezeiten von Runde 1 zu Runde 2 um 36 % verk\u00fcrzt.
- Aufgrund von zusätzlichen Arbeitspaketen, die Gewerk 3 von Gewerk 4 übernommen hat, benötigte Gewerk 3 in Spielrunde 2 mehr (Lern-) Zeit an Arbeitsplatz 1. An den folgenden Arbeitsstationen in Spielrunde 2 wurde diese Einarbeitungszeit bereits wieder ausgeglichen.
- Die Gesamtwartezeiten aller Gewerke in den Spielrunden 2 und 3 wurden auf 35 Minuten und 52 Sekunden (oder um 39 %) gesenkt.
- Erwartungsgemäß verlängerte das Blockieren des direkten Arbeits- und Transportwegs zwischen dem Lager und Arbeitsstation 5 und das Absenken des Arbeitslichts in Arbeitsstation 6 die Gesamtfertigstellungszeit. Durch die Behinderungen waren 84 % beziehungsweise 2 % mehr Zeit zur Fertigstellung der einzelnen Arbeitsschritte notwendig (im Vergleich zu Spielrunde 2) (Bild 6, rechts).
- In Spielrunde 2 wies nur ein Produkt einen Mangel auf, welcher durch das Gewerk vor Ort durch etwas Mehraufwand sofort behoben wurde. In der letzten Spielrunde traten keine Mängel auf.

5 Fazit, Einschränkungen und Ausblick

Der vorliegende Artikel beschreibt eine realitätsnahe Lernumgebung, um BIM-IoT-LC-Kenntnisse spielerisch zu vermitteln. Das Spiel wurde erfolgreich in einer akademischen Lernumgebung evaluiert. Vorläufige Ergebnisse deuten auf die Möglichkeit hin, Technologie in den Prozess des Erfassens, Analysierens und Visualisierens von zuvor nicht verfügbaren Prozessinformationen in Echtzeit einzubetten. Durch die Einbeziehung von neuen Technologien in die Entscheidungsfindung können Verschwendungsfaktoren aufgezeigt und dementsprechend reduziert werden. Lean-Theorien können durch den Einsatz intelligenter und praxistauglicher Methoden und Technologien nun nicht nur in der Ausbildung von Bauingenieuren umgesetzt werden. Die zukünftige Weiterentwicklung dieses Themengebiets in der Lehre kann von mehreren Faktoren abhängen: Sind die Ziele des BIM-IoT-LC-Spiels richtig gesetzt? Wie viele der verschiedenen BIM-Methoden, IoT-Technologien oder LC-Prinzipien können die Teilnehmer effektiv lernen, bevor sie sich überfordert fühlen? Komplexe und mehrstündige Lean-Spiele stoßen hier bereits an die Grenzen der Aufnahmefähigkeit der Teilnehmer, obwohl eigentlich lediglich einfache Grundprinzipien vermittelt werden. Ein weiterer Grund ist die Abhängigkeit des BIM-IoT-LC-Spiels vom Einsatz zuverlässiger Technologie. Während NFC-Tags für die halb automatische Ortung verwendet wurden, bleiben der durchgängige Netzwerkzugriff und die Ortung in Innenräumen ohne Verwendung einer kostspieligen Infrastruktur noch zu lösende Herausforderungen. In solchen Fällen empfiehlt es sich, die Daten vorübergehend auf den tragbaren Geräten zu speichern, bis ein Zugriff in die Cloud wieder gewährleistet ist. Dies würde die beobachteten Vorteile der Echtzeitvisualisierung der erfassten Daten nicht mehr ermöglichen, aber auch die Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes und der sicheren Verwendung von (möglicherweise) personenbezogenen Daten bestehen und muss erörtert werden.

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Forschungsprogramms "Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen" als auch den Europäischen Sozialfonds (ESF) gefördert. Die Autoren danken den Studierenden der Ruhr-Universität Bochum, Universität Brescia, Hongkong Polytechnique University und Universität Kassel für die Teilnahme an den Spielrunden an den jeweiligen Universitäten. Der Deutsche Akademische Austauschdienst (DAAD) ermöglichte die internationale Kollaboration mit Italien. Die Autoren sind für den Inhalt der Publikation verantwortlich.

Literatur

- [1] Koskela, L. J.: Application of the new Production Philosophy to Construction. In: CIFE Technical Report #72, (1992), CIFE, Stanford University.
- [2] Koskela, L. J.: An Exploration Towards a Production Theory and its Application to Constructio. VTT Technical Research Centre of Finland, 2000
- [3] von Heyl, J.; Teizer, J.: Lean Production Controlling and Progress Tracking using Digital Methods. In: Proceedings of the Lean & Computing in Construction Congress (LC3), Heraklion, Greece, (2017), pp. 127–134.
- [4] Demir, S.-T; Theis, P.: Die Interaktion von Building Information Modeling und Lean Construction Management. In: Bauingenieur Jahresausgabe VDI-Bautechnik 2018/2019 (2018), S. 130–135.
- [5] Sacks, R.; Dave, B.; Koskela, L.; Owen, R.: Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. In: Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, (2010), pp. 968–980.
- [6] Sacks, R.; Radosavljevic, M.; Barak, R.: Requirements for building information modeling based lean production management systems for construction. In: Automation in Construction, Vol. 19, (2010), Iss. 6, pp. 641–655.
- [7] Mollasalehi, S.; Aboumoemen, A.A.; Rathnayake, A. et al.: Development of an Integrated BIM and Lean Maturity Model. In: 26th IGLC, Chennai, (2018), pp. 1217–1228.
- [8] Singhal, N.; Ahuja, R.: Can BIM Furnish Lean Benefits an Indian Case Study. In: Proceedings of the 26th Conference of the IGLC, Chennai, India, (2018), pp. 90–100.

- [9] Fosse, R.; Ballard, G.; Fischer, M.: Virtual Design and Construction: Aligning BIM and Lean in Practice. In: Proceedings of the Lean & Computing in Construction Congress (LC3), Heraklion, Greece, (2017), pp. 499–506.
- [10] Tillmann, P.; Sargent, Z.: Last Planner & BIM Integration: Lessons from a Continuous Improvement Effort. In: Proceedings of the 24th Conference of the IGLC, Boston, (2016), pp. 113–122.
- [11] Melzner, J.: BIM-based Takt-Time Planning and Takt Control: Requirements for Digital Construction Process Management. In: Proceedings of the 36th ISARC Conference, Banff, Canada, (2019), pp. 50–56.
- [12] Toledo, M.; González, V.A.; Villegas, A. et al.: Using 4D Models for Tracking Project Progress and Visualizing the Owner's Constraints in Fast-Track Retail Renovation Projects. In: Proceedings of the 22th Conference of the IGLC, Oslo, (2014), pp. 969–980.
- [13] Teizer, J.; Melzner, J.; Wolf, M.; Golovina, O.; König, M.: Automatisierte 4D-Baulaufvisualisierung und Ist-Datenerfassung zur Planung und Steuerung von Bauprozessen. In: Bauingenieur VDI-Jahresausgabe Bautechnik 2017/2018 (2017), S. 127–135.
- [14] Cheng, T.; Yang, J.; Teizer, J.; Vela, P.A.: Automated Construction Resource Location Tracking to Support the Analysis of Lean Principles. In: Proceedings of the 18th Conference of the IGLC, Haifa, Israel, (2010), pp. 643–653.
- [15] Costin, A. M.; Teizer, J.; Schoner, B.: RFID and BIM-enabled worker location tracking to support real-time building protocol and data visualization. In: Journal of Information Technology in Construction (ITcon), Vol. 20 (2015), pp. 495–517.

- [16] 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: Proceedings of the 34th ISARC Conference, Taipei, Taiwan, (2017).
- [17] Li, X.; Shen, G.Q.; Wu, P.; et al.: RBL-PHP: simulation of lean construction and information technologies for prefabrication housing production. In: Journal of Management in Engineering, Vol. 34 (2018), Iss. 2.
- [18] Taneja, S.; Akcamete, A.; Akinci, B. et al.: Analysis of Three Indoor Localization Technologies for Supporting Operations and Maintenance Field Tasks. In: Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 26 (2012), Iss. 6, pp. 708–719.
- [19] Neges, M.; Wolf, M.; Propach, M.; Teizer, J.; Abramovici, M.: Improving Indoor Location Tracking Quality for Construction and Facility Management. In: Proceedings of the 34th ISARC Conference, Taipei, Taiwan. (2017).
- [20] Teizer, J.; Lao, D.; Sofer, M.: Rapid Automated Monitoring of Construction Site Activities using Ultra-Wideband. In: Proceedings of the 24th ISARC Conference, Cochin, India, (2007), pp. 23–28.
- [21] von Heyl, J.; Demir, S.-T.: Digitalizing lean construction with building information modelling. In: Proceedings of the 27th Conference of the IGLC, Dublin, (2019), pp. 843–852.
- [22] Sacks, R.; Esquenazi, A.; Goldin, M.: LEAPCON: Simulation of lean construction of high-rise apartment buildings. In: J. Constr. Eng. Mgmt., Vol. 133 (2007), Iss. 7, pp. 529–539.