

Konzept zur automatischen Baufortschrittskontrolle durch Integration eines Building Information Models und photogrammetrisch erzeugten Punktwolken

SEBASTIAN TUTTAS¹, ALEXANDER BRAUN², ANDRÉ BORMANN² & UWE STILLA¹

Zusammenfassung:

Der Beitrag beschreibt ein Konzept zur Baufortschrittskontrolle, dessen Ziel der Abgleich des aktuellen Bauzustand mit dem geplanten Zustand zur frühzeitigen Erkennung von Störungen im Bauablauf ist. Der Ist-Zustand der Baustelle wird durch photogrammetrische Aufnahmen erfasst. Aus diesen Aufnahmen werden dichte Punktwolken erzeugt, welche mit dem Soll-Zustand aus einem Building Information Model (BIM) abgeglichen werden. Zunächst wird die Bildaufnahme in einem Baustellenszenario dargestellt. Die Vorgehensweise zur Bildorientierung wird hinsichtlich der gemeinsamen Orientierung von Bildverbänden unterschiedlicher Zeitschritte sowie der Koregistrierung von Punktwolke und Modell angepasst. Für den Soll-Ist-Abgleich von Modell und Punktwolke wird ein Maß für die Bestimmung der bestätigten Bauteilfläche vorgestellt. Anhand einer Baustelle im innerstädtischen Raum wird die Punktwolkenerzeugung dargestellt. Der Soll-Ist-Abgleich wird an einem kleinen Baustellenbereich getestet und notwendige Erweiterungen diskutiert.

1 Einleitung

Ein Building Information Model (BIM) beschreibt ein Gebäude über seinen ganzen Lebenszyklus (siehe Abbildung 1). Dies beinhaltet die Planung, das Design, den Bau, den Betrieb sowie die Instandhaltung und gegebenenfalls den Rückbau (vgl. BORMANN 2013 und EASTMAN et al. 2011). Das Modell soll möglichst alle Informationen für sämtliche Projektbeteiligten vorhalten. Neben dem Gebäude selbst werden auch die zeitlichen Abläufe sowie Mengen (z.B. benötigter Stahl- oder Beton) und Kosten modelliert. Es wird nicht nur die 3D-Geometrie des Gebäudes, wie in einem CAD-Modell, wiedergegeben, sondern es werden die einzelnen Objekte mit ihren Bauteileigenschaften modelliert. Eine automatische Baufortschrittskontrolle soll einer Effizienzsteigerung des Bauprozesses dienen und umfasst die Erfassung des aktuellen Bauzustandes, den Abgleich mit dem Sollzustand und die Detektion von Abweichungen im Zeitplan (und evtl. in der Geometrie). Ein BIM liefert dazu die Grundlage, da hier der Sollzustand abgefragt werden kann und es bei etwaigen zeitlichen oder geometrischen Abweichungen die benötigten Daten bereitstellt, möglichst ressourcensparend auf diese reagieren zu können.

Arbeiten zum Thema Baufortschrittskontrolle können anhand der Datengrundlage (Bilder/Videos oder Laserscanner) als auch anhand der behandelten Prozessierungsschritte unterschieden werden. BRILAKIS et al. (2010) stellen ein Konzept zur Bestimmung des Ist-Zustandes von Gebäuden aus

1) Photogrammetrie & Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München, www.pf.bv.tum.de

2) Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation, Technische Universität München,

Arcisstraße 21, 80333 München, www.cms.bgu.tum.de

Video- und Laserscanning-Daten vor. BOSCHÉ (2010) beschreibt die Objekterkennung anhand von Laserscanning-Punkwolken, die mit einem adaptierten Iterative-Closest-Point-Algorithmus (ICP) mit dem Modell koregistriert werden. Die Objekterkennung wird anhand eines Schwellwertes auf das Verhältnis der überdeckten Fläche zur gesamten Objektfläche durchgeführt. Das 3D-Modell muss dazu in eine Dreiecks-Vermaschung zerlegt werden. TURKAN et al. (2012) verwenden so detektierte Objekte um den Baufortschritt abzuleiten und den Zeitplan anzupassen. Auch KIM et al. (2013a) verwenden Laserscanning-Daten. Für ihren Ansatz werden aber zusätzlich RGB-Werte der Punkte aufgenommen. Es werden zunächst Punkte von Betonbauteilen anhand ihrer Farbwerte im HSV-Farbraum mit Hilfe einer überwachten Klassifikation extrahiert. Die Registrierung erfolgt unter der Verwendung von ICP, wozu auch das Modell in eine Punktwolke umgewandelt wird. Schließlich werden die Punkte durch eine überwachte Klassifikation bestimmten Bauteilarten zugeteilt. Wenn die Bauteilart aus der Klassifikation mit der aus dem Modell übereinstimmt, gilt das Objekt als gebaut. In SON & KIM (2010) et al wird ebenfalls der HSV-Farbraum verwendet, um Stahlkonstruktionen zu detektieren. Als Aufnahmeggerät wird ein Stereokamerasystem verwendet. KIM et al. (2013b) aktualisieren den Soll-Zeitplan eines Brückenbauwerks durch die Detektion von fertiggestellten Bauteilen in Bildern einer fest installierten Kamera. GOLPARVAR-FARD et al. (2011a) verwenden unstrukturierte Bilder einer Baustelle zur Erstellung einer Punktwolke. Die Orientierung der Bilder erfolgt unter Verwendung eines Structure-from-Motion-Verfahrens (SfM). Anschließend werden dichte Punktwolken berechnet. Der Abgleich zwischen Punktwolke und Modell erfolgt anhand eines Voxel-Gitters. Der Baufortschritt wird in einem probabilistischen Ansatz bestimmt. Als Alternative Aufnahmekonfiguration für Bilddaten zeigen KLUCKNER et al. (2011) die Datenaufnahme in einem Baustellenszenario unter Verwendung eines UAV. Eine dichte Punktwolke wird durch eine globale Optimierung bestimmt.

Die Testgebiete der genannten Verfahren weisen teilweise nur wenige Störobjekte auf, sind auf einen kleineren Ausschnitt beschränkt oder sind in einer kontrollierten Umgebung angesiedelt (z.B. GOLPARVAR-FARD et al. 2011b). In diesem Beitrag wird ein Ansatz für reale Baustellenszenarios vorgestellt, für den keine dieser Einschränkungen gelten soll. Außerdem soll insbesondere auf die Bedeutung von Passpunkten für die maßstäbliche Rekonstruktion (für Laserscanner nicht relevant) und die Koregistrierung eingegangen werden, die in den genannten

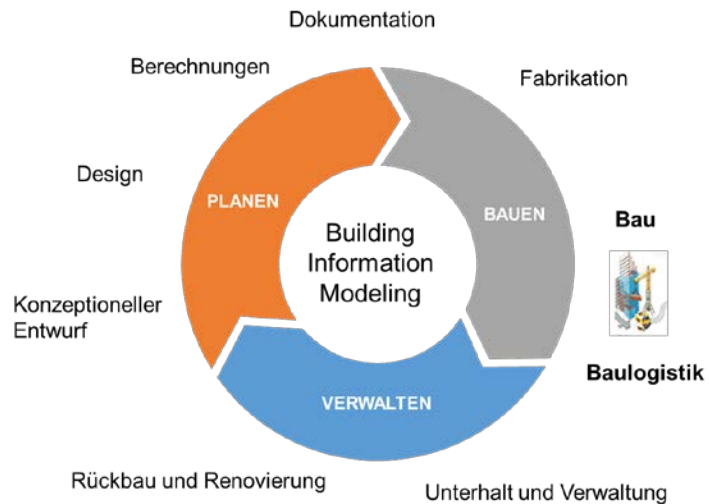


Abb. 1: Anwendungsbereiche des Building Information Models, in Fettdruck die Bereiche, in denen die Baufortschrittskontrolle anzusiedeln ist.

Beiträgen nicht behandelt wird. Das Konzept wird im folgenden Kapitel 2 beschrieben, in Kapitel 3 werden dann erste Ergebnisse von einer realen Baustelle gezeigt.

2 Konzept

Für die Baufortschrittskontrolle unter Verwendung eines BIM sind Konzepte für verschiedene Arbeitsbereiche notwendig. Diese lassen sich in Datenaufnahme, den Abgleich von Soll-Modell und Ist-Zustand (Soll-Ist-Abgleich), sowie die Behandlungen von Abweichungen von der Bauplanung einteilen. Die Zusammenhänge der Aufgaben mit dem BIM sind in Abbildung 2 dargestellt.

In diesem Artikel werden nur die ersten beiden Themen behandelt. Letzterer Bereich unterscheidet sich dahingehend von den anderen, dass in dessen Prozesskette die aufgenommenen Daten nicht direkt verwendet werden. Im Folgenden wird die Strategie zur photogrammetrischen Erfassung der Baustelle vorgestellt (Abschnitt 2.1). Anschließend werden die nötigen Prozessierungsschritte zur Erstellung einer mit dem Modell koregistrierten 3D-Punktwolke dargestellt (Abschnitt 2.2). Zuletzt wird ein Maß zur Bestätigung von im Modell vorliegenden Bauteilen vorgeschlagen (Abschnitt 2.3).

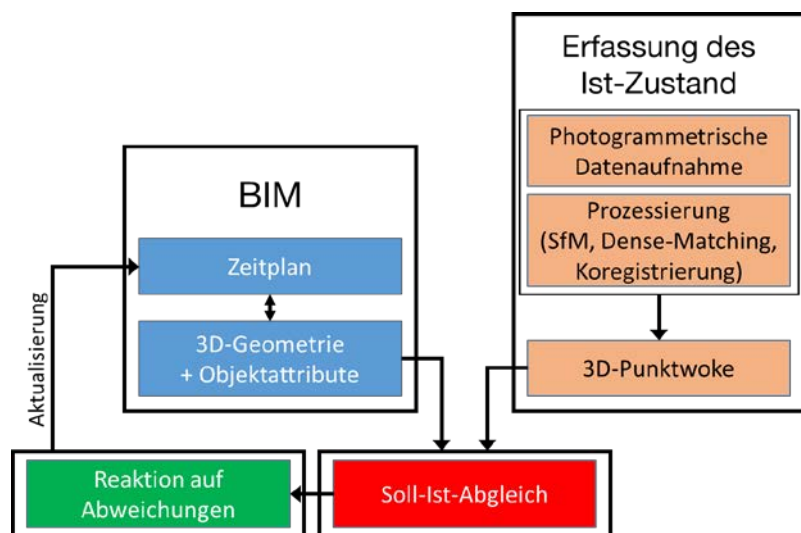


Abb. 2: Arbeitsbereiche zur Baufortschrittskontrolle

2.1 Datenaufnahme

Das Ziel der Datenaufnahme ist die Erstellung einer 3D-Punktwolke in regelmäßigen Abständen. Es müssen mindestens die Bereiche, in denen Änderungen zu erwarten sind, erfasst werden. Als Zeitintervall ist eine Woche anzustreben, wobei hier je nach Bedarf und Aufnahmeaufwand auch eine höhere Aufnahmefrequenz zu realisieren ist.

Im Gegensatz zur photogrammetrischen Aufnahme kleinerer Objekte kann auf einer Baustelle nicht grundsätzlich von einer gleichmäßigen Abdeckung mit sich stark überlappenden Bildern ausgegangen werden. Bilder können auch in Gruppen vorliegen (z.B. aufgrund von unzugänglichen Bereichen oder Bilder vom Boden und vom Kran, vgl. Abbildung 3), die nur wenig oder keinen Überlapp zueinander bieten. Innerhalb der Bildgruppen können Verknüpfungspunkte durch Structure-From-Motion automatisch bestimmt werden. Ungünstige oder eingeschränkte Beobachtungspositionen können, zum Beispiel aufgrund einer einge-

schränkten Basislinienlänge, zu Bereichen mit geringeren Genauigkeiten in der Punktwolke führen, was beim Soll-Ist-Abgleich berücksichtigt werden muss.

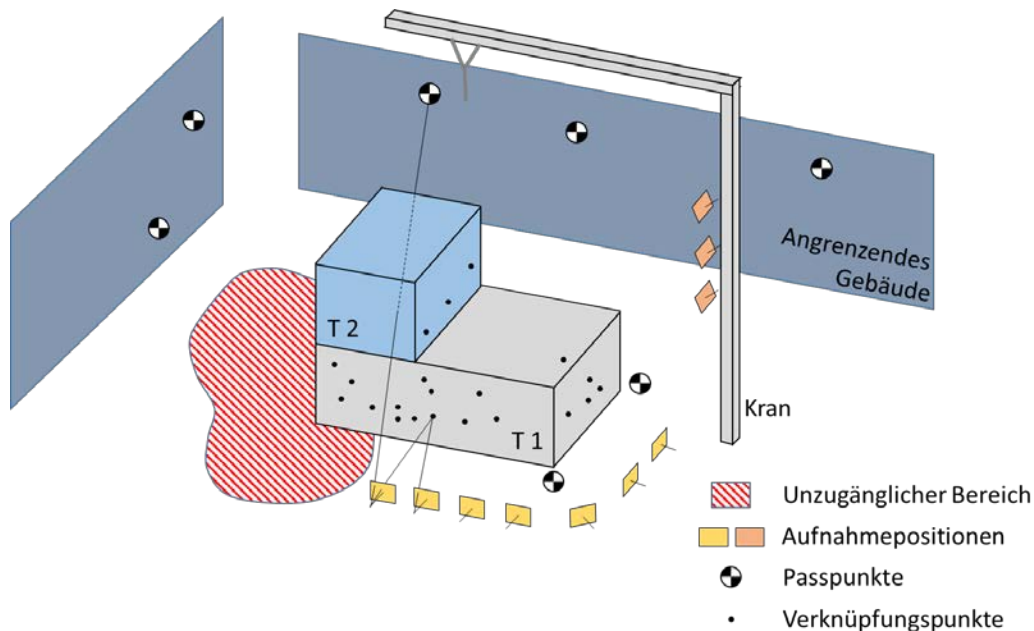


Abb. 3: Mögliches Aufnahmeszenario mit angrenzenden Gebäuden (Bauzustand zu den Zeitpunkten T1 und T2)

Die Einbringung der Maßstabsinformation ist bei oder nach der relativen Orientierung durch SfM nötig. Dieses Problem ist mit der Verknüpfung von nicht überlappenden Bildgruppen und mit der Koregistrierung von Modell und Punktwolke verbunden. Mögliche Vorgehensweisen sind:

- Verwendung von (tachymetrisch) eingemessenen Passpunkten, die im gleichen Baustellensystem vorliegen wie die Modellkoordinaten. Hierzu müssen in den photogrammetrischen Bildern manuell die Passpunkte gemessen werden. Mit Hilfe dieser Punkte können auch, nicht über Verknüpfungspunkte verbundene, Bildgruppen in ein gemeinsames Referenzsystem gebracht werden.
- Messung von Bildpunkten, die eindeutig Punkten im Modell zugeordnet werden können. Dabei muss sichergestellt sein, dass diese bereits als korrekt gebaut im Modell markiert sind.
- Ebenenbasierte Koregistrierung von Modell und Punktwolke (z.B. wie in BOSCHÉ (2012)), wozu zunächst Ebenen in der Punktwolke detektiert werden müssen. Auch hier dürfen nur Ebenen verwendet werden die zu Objekten gehören, die als korrekt gebaut im Modell vorliegen.

Aufgrund der sich ständig verändernden Baustellen- und Verdeckungssituation, kann es notwendig sein, die angewandten Verfahren während des Bauverlaufs zu wechseln oder zu kombinieren. Bildblöcke nachfolgender Zeitschritte können anhand von Bereichen in denen keine Änderungen vorliegen orientiert werden. So bleibt die absolute Orientierung für den nächsten Zeitschritt erhalten, auch wenn Passpunkte durch Verdeckungen eventuell nicht mehr sichtbar sind. Schließlich können alle Bildorientierungen über alle Zeitschritte in einer gemeinsamen

Bündelblockausgleichung bestimmt werden. Eine systematische Aufnahme der Bilder soll sicherstellen, dass die Sichtbarkeit möglichst aller (sich verändernden) Bereiche und der Passpunkte gegeben ist. Für die Koregistrierung muss gewährleistet sein, dass sie nicht anhand von Objekten erfolgt, deren Existenz erst im nachfolgenden Prozess bestätigt werden soll.

2.2 Bilddatenprozessierung

Nach der Bündelblockausgleichung liegen die Orientierungsparameter sowie deren Genauigkeiten für alle Bilder vor. Für das anschließende Bildmatching erfolgt die Auswahl von geeigneten Stereopaaren anhand folgender Bedingungen auf die Kameraausrichtung und die Basislinienlänge:

- Minimale Basislinienlänge (u. A. zum Ausschließen leicht rotierter Bilder an gleicher Position)
- Maximale Basislinienlänge: Wahl eines Wertes anhand Kameraparameter und maximaler Objektentfernung im Baustellenszenario.
- Genähert gleiche Blickrichtung der beiden Bilder eines Stereopaars.
- Winkel zwischen Basislinie und Kamerablickrichtungen ist im Bereich um 90° .

Ergänzend oder alternativ können die Verknüpfungspunkte zur Bestimmung von Stereopaaren herangezogen werden.

Die Prozessierung der Stereopaare ist an ROTHERMEL et al. (2013) angelehnt. Für ein Referenzbild wird unter Verwendung von Semi-Global-Matching (SGM) zu jedem Bild, das mit Hilfe der oben genannten Bedingungen ausgewählt wurde, ein Disparitätenbild berechnet. Anschließend werden die Disparitäten aus jedem Stereopaar, die jeweils für das rektifizierte Referenzbild vorliegen, auf die Pixelpositionen des verzeichnungsfreien Referenzbildes transformiert. Dort findet eine Clusterbildung anhand der Tiefenwerte entlang des Bildstrahls statt. Die Entfernung von Kamerazentrum zum Objektpunkt D wird durch eine Ausgleichung bestimmt, bei der der Rückprojektionsfehler in die rektifizierten Bilder minimiert wird (ROTHERMEL et al. 2013). Mit der ausgeglichenen Entfernung D werden die 3D-Koordinaten (X , Y , Z) jedes Punktes durch

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R^T \cdot (n \cdot D) + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

bestimmt, wobei R die Transformationsmatrix vom Objekt- ins Kamerasystem und n der Richtungseinheitsvektor vom Brennpunkt zum jeweiligen Pixel im Kamerasystem ist.

Die Punktgenauigkeit ergibt sich aus einer Fehlerfortpflanzung unter Verwendung von Formel 1, bei der die Genauigkeiten der Entfernungswerte aus der vorherigen Ausgleichung sowie die in der Bündelblockausgleichung geschätzten Genauigkeiten der Orientierungsparameter des Referenzbildes genutzt werden.

2.3 Soll-Ist-Abgleich

Der Soll-Ist-Abgleich lässt sich in mehrere Prozessierungsstufen unterteilen, welche die direkte Ableitung von Bauwerksteilen aufgrund der Punktwolke, eine indirekte Ableitung von Bauteilen aufgrund von Bedingungen innerhalb des Modells und die Behandlung von Punkten, die nicht eindeutig oder gar nicht zugeordnet werden können, umfassen.

Hier wird ein erstes Bewertungsmaß für die direkte Ableitung von Bauwerksteilen vorgestellt. Für den Soll-Ist-Abgleich wird überprüft, welche (ebenen) Bauteilflächen von Punkten abgedeckt sind. Dazu werden für jede Fläche die Punkte extrahiert, die sich innerhalb der Entfernung Δd vor und hinter ihr befinden. Die Fläche wird in quadratische Rasterzellen mit Kantenlänge x_r aufgeteilt. Für jede Rasterzelle wird aus den jeweils dazugehörigen Punkten das Maß M berechnet, mit dem entschieden wird, ob die Punkte das Bauteil in der entsprechenden Rasterfläche bestätigen:

$$M = \frac{1}{\mu_d} \cdot \sum_i \left(\frac{1}{d_i \cdot \sigma_d} \right) \quad \text{mit} \quad d_i = \begin{cases} d_i = d_i & \text{für } d_i > d_{\min} \\ d_i = d_{\min} & \text{für } d_i \leq d_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

Hierbei wird mit d der orthogonale Abstand eines Punktes (mit dem 3D-Punktfehler σ_d) zur Objektfläche und mit μ_d der Mittelwert aller Abstände pro Rasterzelle bezeichnet. Dieses Maß berücksichtigt den Abstand, die Genauigkeit und die Menge aller Punkte pro Rasterzelle. Um zu verhindern, dass ein einzelner Punkt, der sehr nahe der Ebene liegt, ein zu großes Gewicht erzeugt, wird ein minimaler Entfernungswert d_{\min} festgelegt, der das maximale Gewicht eines Einzelpunktes definiert. Als Wert für d_{\min} sollte mindestens die bestenfalls zu erwartenden Punktgenauigkeit (oder ein größerer Wert) gewählt werden. Der Schwellwert S_M für die Annahme als Bauteilfläche wird (für ein quadratisches Raster) mit

$$S_M = \left(\frac{x_r}{\delta_d \cdot p_d} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_{3D}} \quad (3)$$

bestimmt, wobei p_d die erwartete Punktdichte (definiert über den Abstand zwischen zwei Punkten), δ_d den tolerierten Abstand von der Fläche sowie σ_{3D} die geforderte Punktgenauigkeit darstellt.

Es kann in der Regel nicht davon ausgegangen werden, dass die komplette Bauteilfläche mit Punkten abgedeckt ist. Gründe dafür sind im Wesentlichen Verdeckungen, z.B. durch ein Gerüst oder Baumaschinen, sowie eingeschränkte Aufnahmepositionen. Somit lässt sich kein einfacher Schwellwert auf den Prozentsatz der abgedeckten Fläche anwenden, um Flächen abzuweisen, jedoch kann bei einer hohen Abdeckung das Bauteil als vorhanden registriert werden.

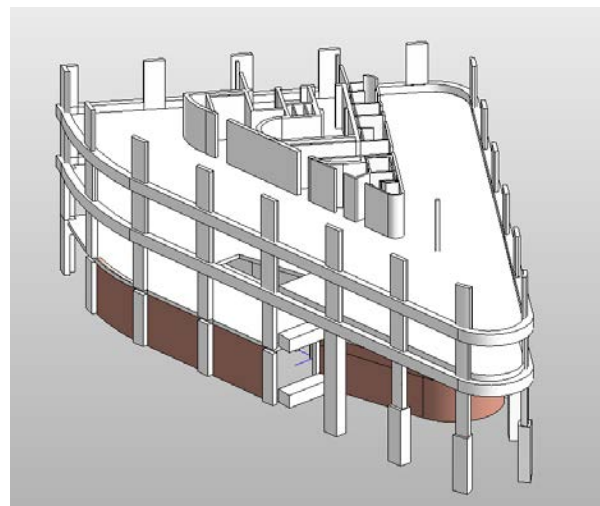
3 TestszENARIO

Als TestszENARIO dient ein mehrstöckiges Haus im innerstädtischen Raum von München. Die photogrammetrischen Aufnahmen zu verschiedenen Bauzuständen wurden im laufenden Betrieb getätigt, ohne den Bauablauf in irgendeiner Weise zu behindern. Die Bildaufnahmen erfolgten mit einer handelsüblichen, kalibrierten, digitalen Spiegelreflexkamera (Nikon D3).

In Abbildung 4a) ist die Punktwolke eines Zeitpunktes zu sehen, Abbildung 4b) zeigt den entsprechend Zustand im Bauwerksmodell. Einen Überblick bietet das vom Kran aufgenommene Bild in Abbildung 4c). Die Abbildung 4d) zeigt alle 80 zu diesem Zeitpunkt getätigten Aufnahmen. Die Orientierung der Bilder wurde gemeinsam mit Bildern vorheriger Zeitschritte in einer Bündelblockausgleichung bestimmt. Passpunktkoordinaten wurden aus einem Laserscan zu Beginn der Bauphase bestimmt. Die Passpunkte wurden durch schwenkbare Zielzeichen auf vier, über den Bauzeitraum stabilen, Betonpfeilern sowie durch Merkmale an angrenzenden Häusern realisiert. Diese Vorgehensweise liefert nicht das gleiche Genauigkeitsniveau wie eine tachymetrische Einmessung, ist aber für die hier gezeigten Tests ausreichend. Die Punktwolke wurde schließlich aus 213 Stereopaarkombinationen berechnet und weist ungefähr 25 Mio. Punkte auf. Der 3D-Punktfehler der Punkte liegt zwischen einem und mehreren cm, wobei Punkte mit einem 3D-Punktfehler von über 5 cm verworfen wurden.



a)



b)

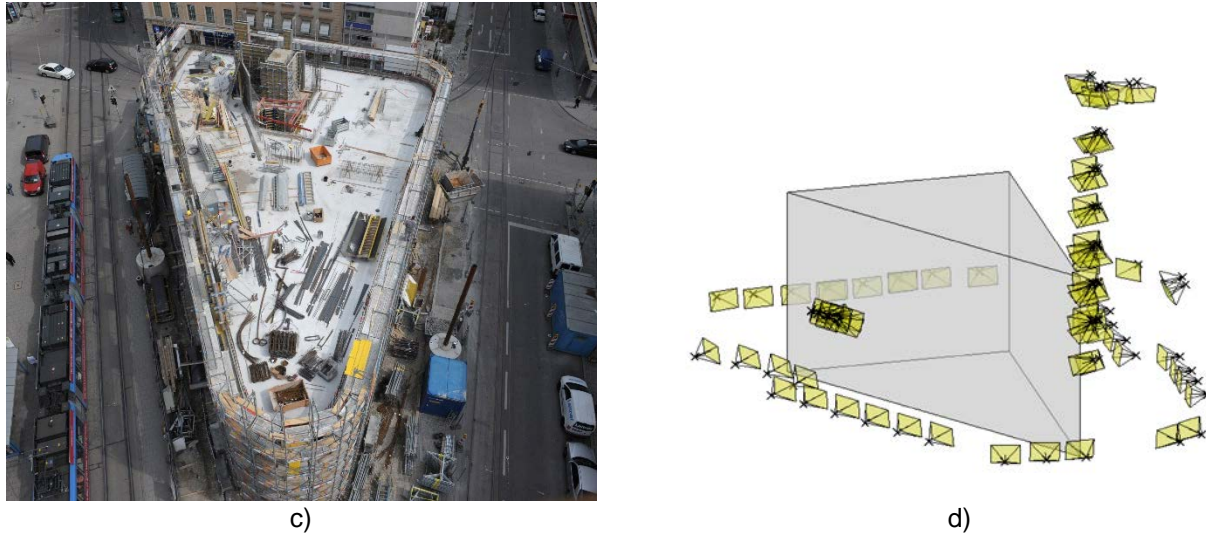
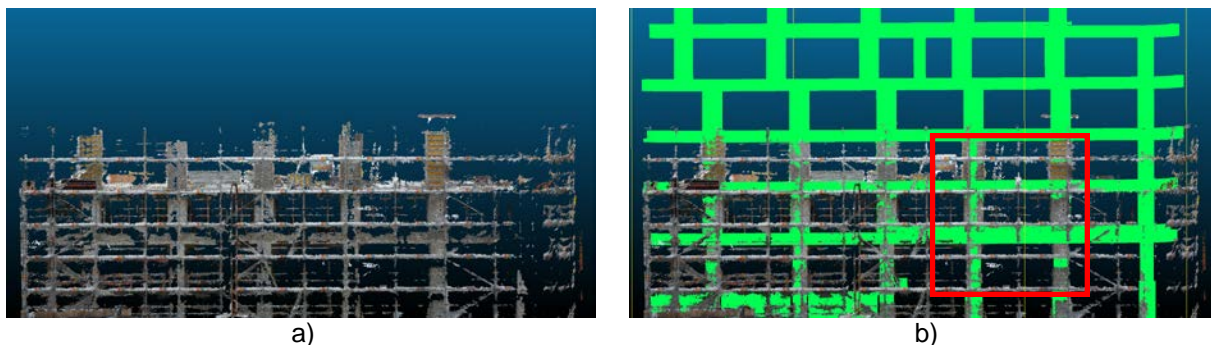


Abb. 4: Punktwolke (a) und Modell (b) der Baustelle, Übersichtsbild vom Kran (c) sowie Aufnahme-positionen (d) für einen Aufnahmezeitpunkt

Die Koregistrierung von Modell zu Punktwolke erfolgte anhand von 11 Passpunkten an bereits fertiggestellten Bauteilen. Die mittlere 3D-Restklaffung der Passpunkte nach der Transformation beträgt 1,9 cm (bei einer Standardabweichung von 1 cm).

Der Soll-Ist-Abgleich wird anhand eines kleinen Ausschnittes mit 13 Bauteilen getestet. Die Umgebung des Testausschnittes ist in Abbildung 5a) ohne Modell und in Abbildung 5b) mit Modell zu sehen. Der in Abbildung 5b) rot umrandete Bereich enthält die 13 Bauteile, die in Abbildung 5c) und 5d) im Detail gezeigt sind. In Abbildung 5c) sind die mit dem Schwellwert $\Delta d = 5$ cm extrahierten Punkte zu sehen. In Abbildung 5d) sind die, mit dem in Abschnitt 2.3 beschriebenen Bewertungsmaß M , bestätigten Modellflächen rot markiert, wobei die Rastergröße $x_r = 10$ cm beträgt. Für die Bestimmung des Schwellwertes S_M werden für den Abstand zwischen zwei Punkten $p_d = 2$ cm, für die Abstandstoleranz $\delta_d = 2$ cm, für die Punktgenauigkeit $\sigma_{3D} = 1$ cm und für den minimale Entfernungswert $d_{\min} = 0,5$ cm angenommen.



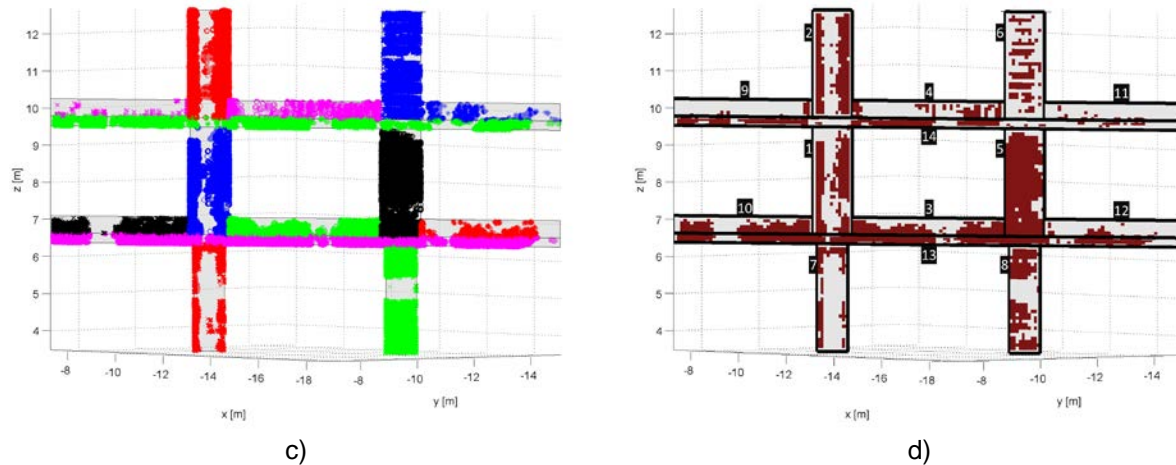


Abb. 5: Ausschnitt aus der Punktwolke ohne Modell (a) und mit Modell (b); c) und d) zeigen den in b) rot markierten Ausschnitt. In c) sind die extrahierten Punkte für die Bauteile (1 bis 13) gezeigt (unterschiedliche Farben zeigen die Zuordnung zu unterschiedlichen Bauteilen an). In d) sind die nach dem Bewertungsmaß M bestätigten Bauteilflächen in Rot dargestellt.

Für die abgedeckte Fläche ergaben sich für die Bauteile die in Tabelle 1 gezeigten Werte, wobei wirkliche vorhandenen Bauteile mit „T“ und nicht vorhandene Bauteile mit „F“ markiert sind. Setzt man einen Überdeckungsgrad von mindestens $\frac{2}{3}$ der Fläche an, so wären nur die Bauteile 5 und 13 erkannt. Alle weiteren vorhandenen Bauteile weisen Werte um die 50% auf, die nicht ohne Prüfung von weiteren Merkmalen als ausreichend für die Bauteilsbestätigung verwendet werden sollten. Die Bauteile 4 und 6 weisen für nicht vorhandene Bauteile mit jeweils ca. 30% hohe Werte auf. Dies ist auf Schalungsteile zurückzuführen, die die Außenhülle eines Bauteils bilden und somit nahe an der Bauteilfläche liegen. Die beiden weiteren nicht vorhandenen Bauteile 9 und 11 haben Abdeckungen von unter 10%.

Tab. 1: Durch Bewertungsmaß M bestätigte Bauteilfläche (Nummerierung siehe Abbildung 5d)

1 (T)	46 %	5 (T)	85 %	9 (F)	7 %	13 (T)	72 %
2 (T)	47 %	6 (F)	29 %	10 (T)	49 %	14 (T)	42 %
3 (T)	54 %	7 (T)	26 %	11 (F)	7 %		
4 (F)	27 %	8 (T)	50 %	12 (T)	13 %		

Das wesentliche Störobjekt, welches die Verdeckungen erzeugt und somit teilweise für geringe Flächenabdeckung bei vorhandenen Bauteilen sorgt, ist hier das Gerüst. Problematisch ist hier, dass es sehr nah an den entsprechenden Bauteilen steht und so auch unterschiedliche Ansichten keine Abhilfe schaffen. Diese Schwierigkeit ist jedoch auf den meisten Baustellen zu erwarten, weshalb ein geeignetes Verfahren benötigt wird, diese zu berücksichtigen. Ein weiteres häufig auftretendes Problem sind die oben genannten Schalungen. Da diese meistens eine auffällige Farbe (orange, rot) haben und die Betonelemente i.d.R. einen Grauton aufweisen, bietet sich hier eine Unterscheidung anhand der RGB-Werte an.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit stellt ein Konzept zur photogrammetrischen Erstellung von Punktwolken für die Baufortschrittskontrolle vor und gibt einen Ausblick auf die Vorgehensweise beim Soll-Ist-Abgleich mit einem BIM. Allgemein ist anzumerken, dass aufgrund nicht zu beeinflussender Randbedingungen des Bauablaufs das Datenaufnahmekonzept stets auf Einschränkungen anpassbar sein muss.

Für die Bestimmung des Ist-Zustandes wird eine dichte Punktwolke aus Aufnahmen einer kalibrierten Kamera berechnet. Zur Bestimmung des Maßstabes werden Passpunkte verwendet, was manuelle Eingriffe bei der Orientierung nötig macht. Für jeden Punkt werden Genauigkeiten berechnet, die im Testszenario im Bereich mehrerer cm liegen. Das gezeigte Bewertungsmaß für die Bauteilerkennung gibt die Punktverteilung gut wieder, kann aber nur für vollständig sichtbare Bauteile eindeutige Ergebnisse liefern und muss somit durch weitere Merkmale und Sichtbarkeitsanalysen erweitert werden.

Zukünftige Aufgaben umfassen die stärkere Automatisierung der Bildorientierung, z.B. durch automatisch erkennbare Passpunkte. Den Soll-Ist-Abgleich können gelernte oder im BIM vorhandene Bauteilattributen, wie z.B. Betonfarbe, unterstützen. Die Bauteilrasterung ist bisher nur für ebene Bauteilflächen umgesetzt und muss für gekrümmte Oberflächen erweitert werden.

5 Danksagung

Wir bedanken uns bei der Firma R. Leitner GmbH & Co Bauunternehmung KG, die uns ermöglichte die Baustelle aufzunehmen, sowie dem Architekturbüro Kuehn Malvezzi GmbH für die Bereitstellung der Gebäudepläne.

Die vorgestellte Arbeit ist Teil des DFG-geförderten Forschungsprojektes „Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur Baufortschrittskontrolle auf Basis der Integration von Punktwolkeninterpretation und 4D-Bauwerksmodellierung“ (STI 545/6-1 und BO 3575/4-1).

6 Literaturverzeichnis

- BORRMANN, A., 2013: Building Information Modeling - Durchgängige Planung, Realisierung und Bewirtschaftung auf Basis eines digitalen Gebäudemodells. 132. DVW-Seminar Terrestrisches Laserscanning, Fulda.
- BOSCHÉ, F., 2010: Automated recognition of 3D CAD model objects in laser scans and calculation of as-built dimensions for dimensional compliance control in construction. *Advanced Engineering Informatics*, **24** (1), S. 107-118.
- BOSCHÉ, F., 2012: Plane-based registration of construction laser scans with 3D/4D building models. *Advanced Engineering Informatics*, **26** (1), S. 90-102.
- BRILAKIS, I.; LOURAKIS, M.; SACKS, R.; SAVARESE, S.; CHRISTODOULOU, S.; TEIZER, J. & MAKHMALBAF, A., 2010: Toward automated generation of parametric BIMs based on hybrid video and laser scanning data. *Advanced Engineering Informatics* **24** (4), S. 456-465.

- EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R. & LISTON, K., 2011: BIM Handbook: a guide to building information modeling for owners managers, designers, engineers and contractors. Hoboken (New Jersey): Wiley.
- GOLPARVAR-FARD, M.; PEÑA-MORA, F. & SAVARESE, S., 2011a: Monitoring changes of 3D building elements from unordered photo collections. Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on, S. 249-256.
- GOLPARVAR-FARD, M.; BOHN, J.; TEIZER, J.; SAVARESE, S. & PEÑA-MORA, F., 2011b: Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. Automation in Construction, **20** (8), S. 1143-1155.
- KIM, C.; SON, H. & KIM, C., 2013a: Automated construction progress measurement using a 4D building information model and 3D data. Automation in Construction, **31**, S. 75-82.
- KIM, C.; KIM, B. & KIM, H., 2013b: 4D CAD model updating using image processing-based construction progress monitoring. Automation in Construction, **35**, S. 44-52.
- KLUCKNER, S.; BIRCHBAUER, J.; WINDISCH, C.; HOPPE, C.; IRSCHARA, A.; WENDEL, A.; ZOLLMANN, S.; REITMAYR, G. & BISCHOF, H., 2011: AVSS 2011 demo session: Construction site monitoring from highly-overlapping MAV images. Advanced Video and Signal-Based Surveillance (AVSS), 2011 8th IEEE International Conference on, S. 531-532.
- ROTHERMEL, M.; WENZEL, K.; FRITSCH, D. & HAALA, N., 2013: SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. LC3D Workshop, Berlin.
- SON, H. & KIM, C., 2010: 3D structural component recognition and modeling method using color and 3D data for construction progress monitoring. Automation in Construction, **19** (7), S. 844-854.
- TURKAN, Y.; BOSCHÉ, F.; HAAS, C. T. & HAAS, R., 2012: Automated progress tracking using 4D schedule and 3D sensing technologies. Automation in Construction, **22**, S. 414-421.