Building Information Modeling (BIM) in der Qualitätskontrolle: Laser-Scanning der Brettschichtholz-Schalungsbauteile für die Herstellung des Schalentragwerks des neuen Stuttgarter Hauptbahnhof (Stuttgart 21)

N. Früh, S. Amorth, Th. Wieland

Zusammenfassung Bauwerke mit komplexen Freiform-Geometrien entstehen mithilfe von Modellen. Wo in der Vergangenheit Hängemodelle aus Ketten, Seifenhäute und eingegipste Membranen zum Einsatz kamen, werden heute virtuelle Bauwerksinformationsmodelle genutzt. Bei der Herstellung von doppelt gekrümmten Geometrien darf es, aufgrund funktionaler und ästhetischer Aspekte, nur sehr geringe Abweichungen zwischen entworfener und hergestellter Form geben. Traditionelle Vermessung reicht in diesen Fällen oft nicht aus, um Soll- und Ist-Geometrie vergleichen zu können. Für die Überprüfung der Maßgenauigkeit der Schalungsbauteile zur Herstellung des Schalentragwerks des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs wurde ein Laser-Scanning Prozess entwickelt. Damit können die Brettschichtholz-Schalungsbauteile im Herstellungsprozess vermessen und ausgewertet werden. Der Artikel beschreibt den automatisierten Prozess, mit dem der modellbasierte Vergleich von Soll- und Ist-Geometrien komplexer Formen möglich ist.

Dipl.-Ing. Nikolas Früh
nikolas@frueh.co, Tel. 01577 3343539
Früh Engineering
Universität Stuttgart
Institut für Tragkonstruktionen und konstruktives Entwerfen
Böblinger Straße 181b, 70199 Stuttgart

Dipl.-Ing. (FH) Andreas Amorth
andreas.amorth@zueblin.de, Tel. 08251 908 149

Thomas Wieland, B. Eng.
thomas.wieland@zueblin.de, Tel. 08251 908 140

Züblin Timber GmbH
Industriestraße 2, 86551 Aichach

1 Von der Formfindung zur Realisierung

Der neue Stuttgarter Hauptbahnhof wird von einem Schalentragwerk aus Weißbeton überspannt. Die Form der charakteristischen Kelchstütze und des Schalendaches wurde von Frei Otto mithilfe von Seifenhaut- und Hängemodellen gefunden. Ursprünglich war eine leichte, zugbeanspruchte Membrankonstruktion angedacht. Im Entwurfsprozess hat sich das Konzept allerdings hin zu einer druckbeanspruchten Schale entwickelt. Das Atelier des Pritzker-Architekturpreisträgers Frei Otto hat im Auftrag von Ingenhoven Architects und Buro Happold über 40 Arbeitsmodelle zur Formfindung angefertigt [1] (**Bild 1**).

Im August 2014 hat die Ed. Züblin AG mit den Bauarbeiten am eigentlichen Bahnhofsbauwerk begonnen [2]. Im Juni 2017 wurde der erste Fuß der Kelchstützen (Kelchfuß) mit einer Höhe von circa 6 m erfolgreich betoniert [3]. Eine der zahlreichen technischen Herausforderungen des Projekts ist das Schalungskonzept zur Herstellung der komplexen Geometrie des Schalendachs und der Kelchstützen aus Stahlbeton (**Bild 2**).

Die Züblin Timber GmbH in Aichach hat dafür eine Konstruktion aus Brettschichtholz mit einer Beschichtung aus faserverstärktem Kunststoff entwickelt. Die Anforderungen an die Bauteile sind vielfältig. Die Unterteilung der einzelnen Schalungsbauteile folgt dem vom Architekten gewählten Fugenbild. Der für das Projekt konzipierte Weißbeton fordert ein hohes Maß an Tragfähigkeit und Temperaturbeständigkeit. Die Qualität der Betonoberfläche muss den Kriterien der Sichtbetonklasse 4 genügen. Die Vorgaben der DIN 18202 Toleranzen im Hochbau – Bauwerke definieren die Maßgenauigkeit der Sichtbetonoberfläche. Um die einzelnen Schalungsbauteile korrekt zu einer Einheit zusammensetzen zu können, müssen schließlich auch Seiten- und

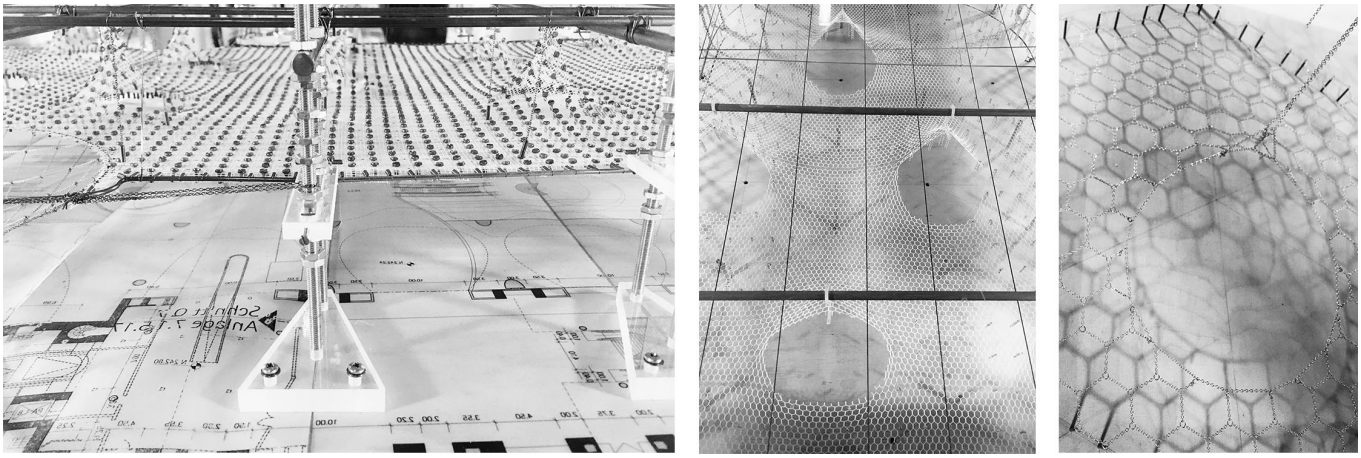

Bild 1. Hängemodelle des Atelier Frei Otto zur Formfindung des Schalendachs des Stuttgarter Hauptbahnhofs (Stuttgart 21) bei der Frei Otto Ausstellung im Zentrum für Kunst und Medien in Karlsruhe (05.11.2016 – 19.03.2017)

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

Bild 2. Kelchstütze des neuen Stuttgart Hauptbahnhofs
Abb.: ingenhoven architects [4]

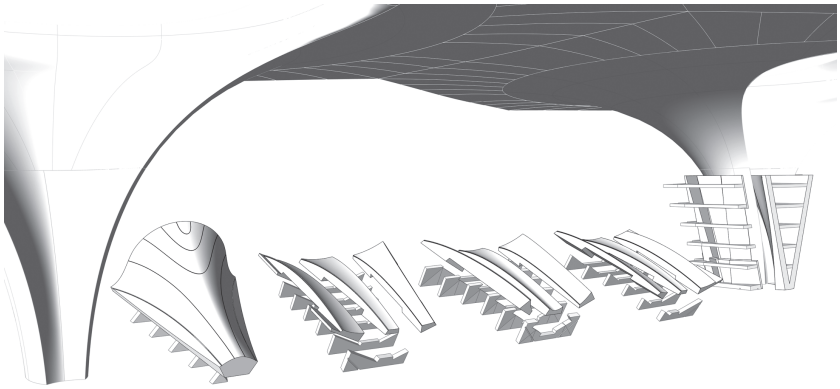

Bild 3. Übersicht der einzelnen Schalungsbauteile für den Kelchfuß

Stirnflächen eine sehr hohe Passgenauigkeit aufweisen (**Bild 3**).

2 Konstruktion und Qualitätskontrolle der Schalungsbauteile aus Brettschichtholz

Der Rohkörper aus Brettschichtholz wird in mehreren Lagen mit unterschiedlichen Höhen hergestellt. Die einzelnen Lagen werden verleimt und verschraubt. Die endgültige Form entsteht durch Überfräsen der Rohform. Im letzten Arbeitsschritt der Herstellung wird die Oberfläche der Brettschichtholzkörper mit faserverstärktem Kunststoff beschichtet.
Um die geforderte Maßgenauigkeit der Oberfläche vor und nach der Beschichtung feststellen zu können, müssen die Bauteile vermessen werden. Das Verfahren dazu muss ein räumliches Aufmaß der Bauteile in der geforderten Präzision liefern können und problemlos im Werk durchführbar sein. Das terrestrische Laser-Scanning erfüllt diese Kriterien. Bei dem Verfahren wird ein Laserstrahl über einen horizontal rotierenden, polygonalen Spiegel geleitet (vertikale, linienartige Aufzeichnung von Punkten), während sich das Gerät um die eigene Achse dreht. Die Rotationsgeschwindigkeit des Gerätes bestimmt die Winkelabstände der vertikalen Aufzeichnungen und somit die Dichte der aufgezeichneten Punkte. Die Entfernung zu den abgetasteten Punkten und damit die Punktkoordinaten können je nach Gerät mit dem Impulslaufzeit- oder Phasendifferenzverfahren bestimmt werden. Der hier verwendete Laser-Scanner Riegl VZ400 nutzt das Impulslaufzeitverfahren. Dabei treffen die emittierten Laser-Impulse auf Objekte und erzeugen dabei Echo-Impulse. Diese werden über den rotierenden Spiegel auf einen optischen Empfänger im Gerät umgelenkt. Die optischen Signale werden in elektrische umgewandelt und digitalisiert. Mithilfe von Online-Wellenformberechnungen werden die Amplituden des Echo-Impulses, deren zeitlichen Abstände und der Reflektionswert des Zielobjekts bestimmt. Daraus wird die Entfernung zum Zielobjekt und ein Abweichungswert berechnet [5]. Der Abweichungswert gibt die Zuverlässigkeit der bestimmten Punktkoordinate an (**Bild 4**).

3 Laser-Scanning-Prozess zur Vermessung und Auswertung der Maßgenauigkeit der Oberfläche der Schalungsbauteile

Die Produktion der Brettschichtholz-Bauteile erfolgt über einen längeren Zeitraum. Daher wurde ein Messstand am Fertigungsort eingerichtet, der das kontinuierliche Monitoring

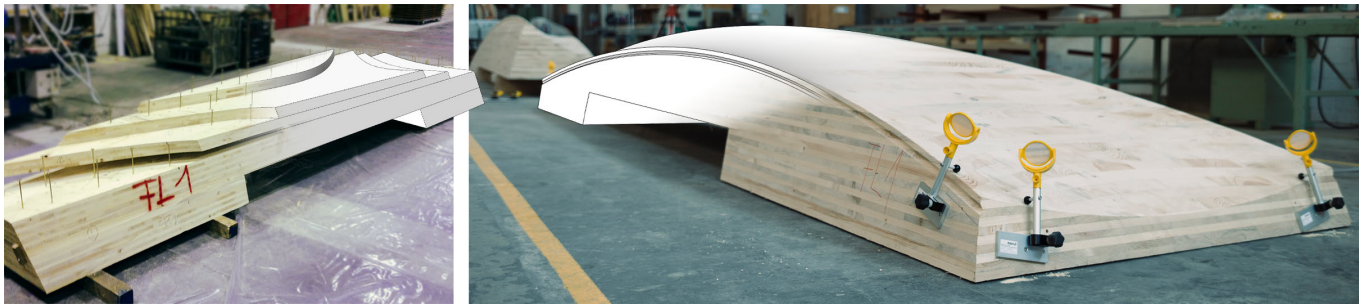

Bild 4. Modell und Realität, ein Schalungsbauteil in verschiedenen Stufen des Herstellungsprozesses

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

der Bauteile ermöglicht. Dazu wurde der Laser-Scanner mit einer Stahlkonsole an einer Stahlbetonstütze in einer der Fertigungshallen montiert. Ziel des Messaufbaus ist es, Vermessung und Auswertung soweit wie möglich zu automatisieren, Kosten zu senken und die Bedienung für den Anwender möglichst einfach zu gestalten. Der verwendete Laser-Scanner wurde dementsprechend ausgewählt, da dieser über einen Netzwerkanschluss mit der Software Riegl RiScan Pro gesteuert werden kann. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, über vom Hersteller angebotene Programmbibliotheken direkt auf die aufgezeichneten Daten zugreifen zu können. Die Daten können somit beispielsweise in eigene Anwendungen oder andere Softwareumgebungen eingebunden werden.

Bild 5. Universelle Messvorrichtung zur Platzierung von Passpunkten an den Brettschichtholz-Schalungsbauteilen

3.1 Transformation der Koordinatensysteme – Referenzieren der Punktwolke zur Soll-Geometrie

Um Soll- und Ist-Geometrien miteinander vergleichen zu können, müssen deren Koordinatensysteme zueinander referenziert werden. Dies kann über definierte Passpunkte am Bauteil, oder über Best-Fit-Algorithmen erfolgen. Diese Algorithmen verschieben und rotieren die Ist-Geometrie so lange relativ zur Soll-Geometrie, bis der normale Abstand zwischen beiden Geometrien so gering wie möglich wird. Um die bestmögliche Präzision bei dem Geometrievergleich zu erreichen, wird über acht Passpunkte referenziert. Damit kann auch überprüft werden, ob die Neigung der Seitenflächen (Passgenauigkeit der zusammengesetzten Schalungsbauteile) mit der Soll-Geometrie übereinstimmt. Diese Punkte müssen als Soll-Koordinate vorliegen und als Ist-Koordinate von dem Laser-Scanner erfasst werden können. Zur optischen Erfassung eines Passpunktes werden, abhängig von eingesetzter Hard- und Software, verschiedene Zielarten verwendet. Gängig sind unter anderem Zieltafeln mit aufgedrucktem Schachbrettmuster, Referenzkugeln mit definiertem Durchmesser (unabhängig von der Blickrichtung), oder mit reflektierender Folie beklebte Scheiben (Reflexmarken). Entscheidend ist die Bestimmbarkeit einer exakten Koordinate aus den zahlreichen Punkten der aufgenommenen Punktwolke.

In **Bild 5** sind die gelb eingefassten Reflexmarken abgebildet, die im vorliegenden Projekt zur Erfassung der Ist-Koordinaten eingesetzt werden. Die kreisförmige Reflektor-Folie hat im Zentrum ein kreisförmiges Loch. Durch den großen Unterschied des gemessenen Reflektionswertes zwischen Reflektor-Folie und Umgebung können die Reflexmarken von der Verarbeitungssoftware Riegl RiScan Pro automatisch erfasst werden.

3.2 Messvorrichtung und automatisierte Konstruktion der Referenzpunkte

Um acht Reflexmarken an den stark unterschiedlichen Bauteilen positionieren zu können, wurde von Früh Engineering in Zusammenarbeit mit der Goecke GmbH & Co. KG eine universelle Messvorrichtung (Bild 5) entwickelt. Diese besteht aus einem Anschlagblech mit zwei Passstiften und einer Klemmvorrichtung für einen Stab. Dieser trägt die Reflexmarke und verfügt über eine angesetzte Kugel, die die Höhe des Bauteils an der entsprechenden Stelle abnimmt. Die Bohrungen im Holz für die Passstifte werden maschinell erstellt. Die Messvorrichtung kann so definiert an der Seitenfläche des Bauteils angebracht und mit einer Schraube fixiert werden. Klemmvorrichtung und Stab haben Markierungen, damit kann der Stab orthogonal zum Anschlagblech positioniert werden. Der Stab wird so lange in seiner Achse verschoben, bis die Kunststoffkugel die Bauteiloberfläche berührt. Somit wird ein gleichbleibender Abstand zwischen Bauteiloberfläche und Kreiszentrum der Reflexmarke hergestellt.

Die Soll-Koordinate der Passpunkte wird mit der Visual-Programming-Umgebung Grasshopper für die Freiform-Modellierungssoftware McNeel Rhinoceros erzeugt. Dafür wurde ein Algorithmus entwickelt, der auf Basis der Ober- und Seitenflächen eines beliebigen Bauteils (unabhängig

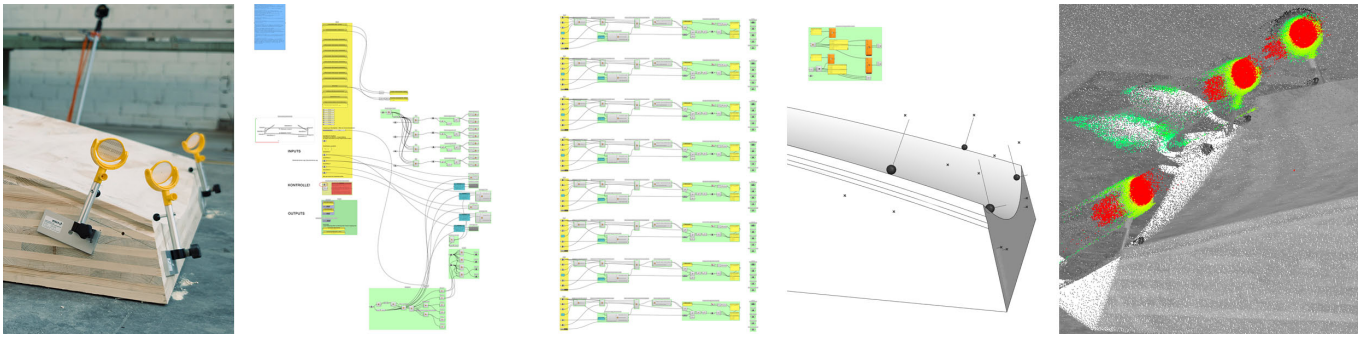

Bild 6. Passpunkte zum Referenzieren der Koordinatensysteme von Soll- und Ist-Geometrie, von links nach rechts: Passpunkte am Bauteil (Ist-Koordinaten), Algorithmus zur Erstellung der Soll-Koordinaten in der Visual-Programming-Umgebung Grasshopper, Passpunkte im Laser-Scan

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

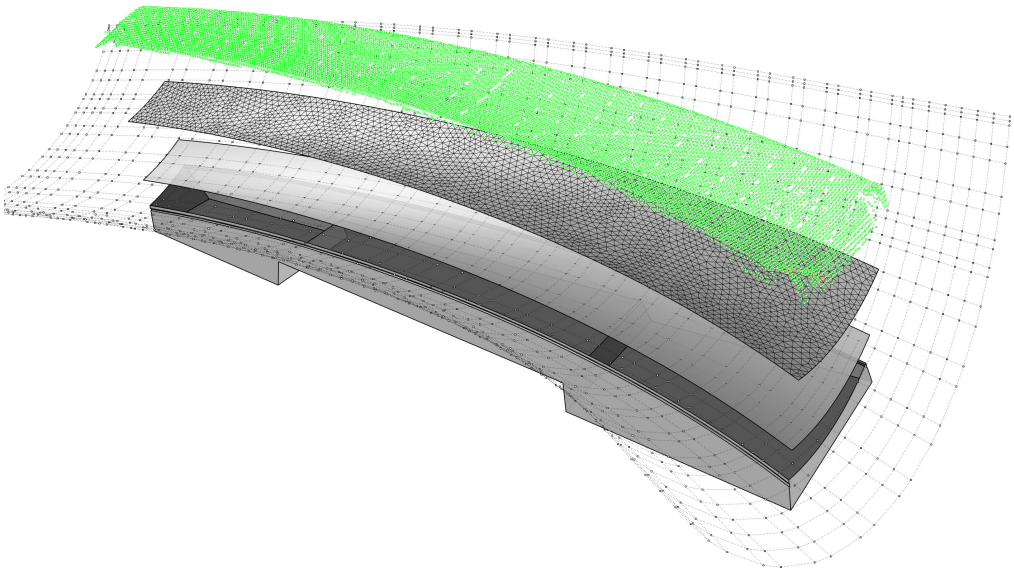

Bild 7. Soll- und Ist-Geometrie: NURBS-Fläche mit Kontrollpunkten (Schalhaut), Dreiecksnetz als Grundlage für die Ermittlung des normalen Abstands und entsprechend eingefärbte Punktwolke

von dessen Position im lokalen Koordinatensystem) den Punkt im Kreiszentrum der Reflexmarke konstruiert. Auf jeder der vier Seitenflächen der Bauteile werden zwei Referenzpunkte erzeugt. Dabei kann der Abstand zum Eckpunkt des Bauteils und die ausgefahrene Stablänge frei gewählt werden. Die Koordinate der Referenzpunkte wird, wie bei der realen Messvorrichtung, durch die Bestimmung des Oberflächenkontakts der Kugel bestimmt. Die Koordinaten für Bohrungen und Referenzpunkte werden als Geometrieobjekte erzeugt und in Textdateien exportiert. Die Fräsprogramme zur Herstellung der komplex geformten Oberfläche der Bauteile werden ebenfalls mit Grasshopper erzeugt (**Bild 6**).

3.3 Laser-Scan und Auswertung

Die Brettschichtholzbauteile werden nach dem Fräsprozess zum Messstand transportiert. Der festgelegte Messbereich des Laser-Scanners ist auf dem Boden der Fertigungshalle markiert. Der Messbereich wurde einmalig definiert und ist auf dem Scanner als Winkelinformation (Pattern) hinterlegt. Die Auflösung der Punktwolke wurde so gewählt, dass der mittlere Punktabstand auf der Bauteiloberfläche 1 mm beträgt. In der Scanning- und Post-Processing-Software Riegl RiScan Pro werden automatisch die Reflexmarken im Scan gesucht und mit einem abgeschwächten, für die Reflektorfolie ausgelegten Laser-Impuls nachvermessen (Fine-Scan). Der Durchmesser der Reflexmarken wurde zuvor in der Software als Reflektor-Typ hinterlegt. Auf Basis dieser Information bestimmt die Software das Kreiszentrum und somit die Ist-Koordinaten der Passpunkte. Daraufhin kann das lokale Koordinatensystem des Scans in das lokale Koordinatensystem der Soll-Geometrie (Projektkoordinatensystem) transformiert werden. Dafür wird die entsprechende Transformationsmatrix (Sensor's Orientation and Position SOP) für den aufgenommenen Scan angelegt. Durch diese Operation entsteht eine Abweichung zwischen Soll- und Ist-Koordinaten der Passpunkte. Die Standardabweichung konnte im eingesetzten Verfahren auf 2 mm reduziert werden.

Im nächsten Schritt wird die Punktwolke gefiltert und nachbearbeitet. Alle Punkte unterhalb einer festgelegten Z-Koordinate (0,10 m über dem Hallenboden) und oberhalb eines definierten Abweichungswertes (Qualität der Punktkoordinate) werden entfernt. Mithilfe eines 2.5D-Rasters wird die Punktwolke gefiltert. In einem vom Anwender definierten Raster werden dabei, in Bezug auf eine Referenzebene (hier die XY-Ebene des Projektkoordinatensytems) alle Punkte innerhalb einer Rasterzelle zu einem Punkt zusammengefasst. Dabei werden alle Koordinaten der Punkte gemittelt [6]. Diese Filter-Operation wird durchgeführt, um erstens genauere Vergleichskoordinaten zu erhalten und zweitens bei Abweichungen die entsprechende Stelle auf dem Bauteil genau identifizieren zu können.

Die Soll-Geometrie des Bauwerks wurde vom Architekturbüro Ingenhoven Architects definiert und als 3D-Modell (McNeel Rhinoceros) übergeben. Die anhand der Schalfugen eingeteilten NURBS-Flächen (Non-Uniform Rational Basis-Splines) wurden von der Arbeitsvorbereitung der Züblin Timber GmbH übernommen. Die Modellierung der Schalungskörper erfolgt ebenfalls in McNeel Rhinoceros. Auf dieser Datengrundlage wurde von Früh Engineering ein BIM-Prozess entwickelt, um die Maßgenauigkeit der Schalungsbauteile überprüfen und nachweisen zu können.

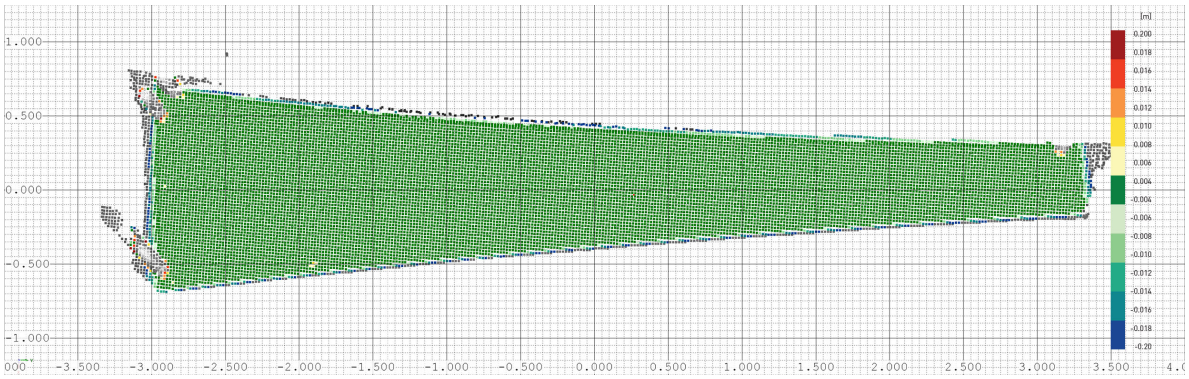

Bild 8. Eingefärbte Punktwolke und Farbskala zur Darstellung der Maßgenauigkeit der Oberfläche eines Schalungsbauteil aus Brettschichtholz für das Prüfprotokoll

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

Um Soll- und Ist-Geometrie miteinander vergleichen zu können, wird die NURBS-Fläche der Schalungsoberfläche in ein Dreiecksnetz umgewandelt. Die dabei erlaubte Abweichung zwischen NURBS-Fläche und Dreiecksnetz beträgt 0,1 mm.
Das Dreiecksnetz wird in Riegl RiScan Pro importiert und kann dort mit der Punktwolke verglichen werden. Der Algorithmus Surface Comparison der Software berechnet zunächst die Normalenvektoren der einzelnen Dreiecke und daraufhin die der Punkte. Die Normalenvektoren aller angrenzenden Dreiecke werden dazu gemittelt. Im letzten Schritt wird die Distanz von jedem Punkt der Punktwolke zu dem Dreiecksnetz errechnet. Der Anwender gibt einen Suchradius vor, in dem nach dem nächsten Punkt des Dreiecksnetzes gesucht wird. Wenn für den Punkt ein Normalenvektor vorliegt, wird der normale Abstand der beiden Punkte berechnet. Der Abstandswert wird ungültig gesetzt, wenn der gefundene Punkt keinen Normalenvektor hat, oder kein Punkt gefunden wurde [5]. Das Ergebnis wird in einer, vom Anwender gewählten Farbskala angezeigt. Dabei kann ein neutraler Bereich definiert werden, für den alle Punkte in einer gewählten Farbe dargestellt werden. Diese Funktion wird zur Überprüfung der Maßgenauigkeit der Bauteiloberfläche innerhalb der festgelegten Toleranzen genutzt. Alle Werte innerhalb des Toleranzbereichs werden in grün dargestellt (**Bild 7**).
Die farbige Darstellung der Punktwolke zeigt in Kombination mit der entsprechenden Skala die Maßgenauigkeit der Bauteiloberfläche. Ein darübergelegtes Raster unterstützt den Anwender dabei, eventuelle Fehlstellen auf dem Bauteil zu finden. Darstellung und Farbskala werden zusammen mit Soll- und Ist-Koordinaten der Passpunkte aus Riegl RiScan Pro exportiert. Da in der Software keine Berichte erstellt werden können, wird das Prüfprotokoll mithilfe eines VBA-Skripts (Visual Basic for Applications) in Microsoft Excel erstellt (**Bild 8**).

3.4 Automatisierung des Qualitätssicherungsprozesses

Die Zielsetzung der Automatisierung war es, einen einfachen und anwenderfreundlichen Prozess für die wiederkehrende Scan-Aufgabe zu schaffen. Vermessung und Auswertung der Bauteile sollte im Werk ausgeführt werden können. Der von Früh Engineering etablierte Arbeitsablauf zur Überprüfung der Maßgenauigkeit der Oberfläche von Brettschichtholz-Schalungsbauteilen mit doppelt gekrümmten Geometrien besteht aus folgenden Schritten:

1. Erzeugen der Soll-Koordinaten der Passpunkte und der Bohrkoordinaten für acht Messvorrichtungen
2. Erzeugen des Dreiecksnetzes aus der NURBS-Fläche
3. Platzieren des Bauteils im Messbereich und Anbringen der Messvorrichtungen
4. Laser-Scan des Bauteils
5. Finden der Passpunkte im Laser-Scan und Aufnehmen der Fine-Scans der Passpunkte zur exakten Bestimmung der Ist-Koordinate
6. Transformation des Koordinatensystems des aufgenommenen Bauteil-Scans in das Projektkoordinatensystem und Kontrolle der Standardabweichung des Fehlers zwischen Soll- und Ist-Koordinaten der Passpunkte
7. Ermitteln des normalen Abstandes der Punktwolke zum Dreiecksnetz und Exportieren der Darstellung der eingefärbten Punktwolke
8. Erstellen und Exportieren des Prüfprotokolls

Die ersten beiden Schritte sind vorbereitend für den Prozess und können unabhängig von der Vermessung und Auswertung durchgeführt werden. Dabei müssen Ober- und Seitenflächen eines Bauteils ausgewählt werden und die Daten werden automatisch erzeugt. Riegl RiScan Pro bietet nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten zur Automatisierung von Arbeitsabläufen. Daher werden die Schritte drei bis sieben über skriptbasierte Maus- und Tastaturbefehle gesteuert. Der Anwender muss zum Anstoßen des Qualitätssicherungsprozesses das entsprechende Skript ausführen. Während der Ausführung erscheinen Dialogfenster, die den aktuellen Schritt und die verbleibende Zeit des gesamten Vorgangs anzeigen. Nach Abschluss der Schritte drei bis sieben wird eine Microsoft Excel Datei geöffnet. Auf Basis eines VBA-Skripts werden die Daten aus Riegl RiScan Pro importiert und das Prüfprotokoll an der entsprechenden Stelle auf einem Fileserver abgelegt.

4 Fazit

Maßgenauigkeit von maschinell hergestellten, doppelt gekrümmten Oberflächen kann mithilfe von Laser-Scanning kontrolliert und nachgewiesen werden. Bisher eingesetzte Schalungsbauteile konnten maß- und passgenau hergestellt, auf der Baustelle aufgebaut und mit Beton befüllt werden. Der erste betonierte Kelchfuß des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs konnte damit innerhalb der vorgegebenen Toleranzen der DIN 18202 hergestellt werden.
Es wurde ein weitgehend autonomer kostengünstiger Prozess entwickelt, mit dem Schalungsbauteile aus Brettschichtholz am Produktionsort vermessen werden können. Der eingesetzte Laser-Scanner nutzt das Impulslaufzeitverfahren zur Bestimmung der Punktkoordinaten und hat eine Reichweite von 400 m. Mit einer universellen Messvorrichtung können Passpunkte an Bauteilen mit variabler Geometrie angebracht werden. Dafür notwendige Bohrungen werden von einem Industrieroboter gesetzt. Die Passpunkte erlauben ein Referenzieren der Koordinatensysteme von Soll- und Ist-Geometrie zueinander mit einer Genauigkeit von 2 mm. Die Soll-Koordinaten der Passpunkte und die zur Montage notwendigen Koordinaten und Achsen der Bohrlöcher können mit einem Algorithmus automatisch erzeugt werden. Durch eingefärbte Punktwolken kann die Maßgenauigkeit von Freiformbauteilen innerhalb einer vorgegebenen Toleranz (in diesem Fall DIN 18202 Toleranzen im Hochbau) dargestellt und nachgewiesen werden. Die eingesetzte Scan- und Post-Processing-Software steuert den Laser-Scanner über eine Netzwerkverbindung. Dadurch kann die Vermessung auch ferngesteuert durchgeführt werden.
Da die eingesetzte Software nicht automatisiert werden kann, wurde auf eine Programmiersprache zurückgegriffen, mit der Windows Applikationen gesteuert werden können. Damit entwickelte Skripte können aufgrund diverser Anpassungen nur auf dem dafür vorgesehenen Computer genutzt werden.
Weiterer Entwicklungsbedarf besteht bei der Automatisierung des Prozesses. Um diese universell einsetzbar zu machen und den Softwarebedarf zu reduzieren, könnte der ge-

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf

Bild 9. Von der Schalung zum fertigen Bauteil, von links nach rechts: Laser-Scan während dem Probeaufbau der Schalung im Werk, hergestellter Kelchfuß mit daneben aufgestellten Schalungsbauteilen

samte Vermessungs- und Auswertungsprozess in der Visual-Programming Grasshopper aufgesetzt werden. Um den Laser-Scanner mithilfe der Programmbibliotheken direkt ansteuern zu können, müssten eigene Programmerweiterungen geschrieben werden. So könnten die Datensätze in McNeel Rhinoceros importiert und ausgewertet werden. Für die Verarbeitung von Punktwolken in Grasshopper wurde im Rahmen des EU-geförderten Forschungsprojekts Durable Architectural Knowledge die Erweiterung Volvox entwickelt. Damit können unter anderem die Funktionen der Open-Source Software Cloud Compare zur Verarbeitung von Punktwolken direkt in Grasshopper ausgeführt werden [7] (**Bild 9**).

Literatur

[1] *Vrachliotis, G.:* Frei Otto. Denken in Modellen. Spectormag, Leipzig, 2017.

[2] Stuttgarter Zeitung: Bahn hebt erste Baugrube für den Tiefbahnhof aus. 2014, http://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.stuttgart-21-bahn-hebt-erste-baugrube-fuer-den-tiefbahnhof-aus.35d1972b-dad9–4c26-bda7-fd35a68dae52.html, 2017-08-08.

[3] DB Projekt Stuttgart–Ulm GmbH: News-Archiv. Kelchfuß von Schalung befreit. 2017, http://www.bahnprojekt-stuttgart-ulm.de/no_cache/projekt/aktuell/archiv-suche/news-archiv-detail/news/1289-kelchfuss-von-schalung-befreit/newsParameter/detail/News/datum/20170627/, 2017-08-08.

[4] DB Projekt Stuttgart–Ulm GmbH: Mediathek. FaSzination 21– Visualisierungen: Vom Musterkelch zum Lichtaugenbahnhof. http://www.bahnprojekt-stuttgart-ulm.de/uploads/tx_smediamediathek/20151013-FaszinationS21-Durchgangsbahnhof_Stuttgart_Kelchstuetze_Lichtauge-ingenhoven_architects.jpg, 2017-08-08.

[5] 3D Terrestrial Laser Scanner Riegl VZ-400 Riegl VZ-1000 Riegl VZ-2000. General Description and Data Interfaces. Riegl Laser Measurement Systems GmbH, Horn, 2015, pp. 19–20.

[6] Operating & Processing Software RiScanPro for Riegl 3D Laser Scanners Manual. Riegl Laser Measurement Systems GmbH, Horn, 2013.

[7] *Zwierzycki, M.; Evers, H.; Tamke, M.:* Parametric Architectural Design with Point-clouds – Volvox. *In: Herneoja, A.; Österlund, T.; Markkanen, P.* (eds.): Complexity & Simplicity – Proceedings of the 34th eCAADe Conference – Vol. 2 (2016), University of Oulu, Finland, pp. 673–682.

Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf