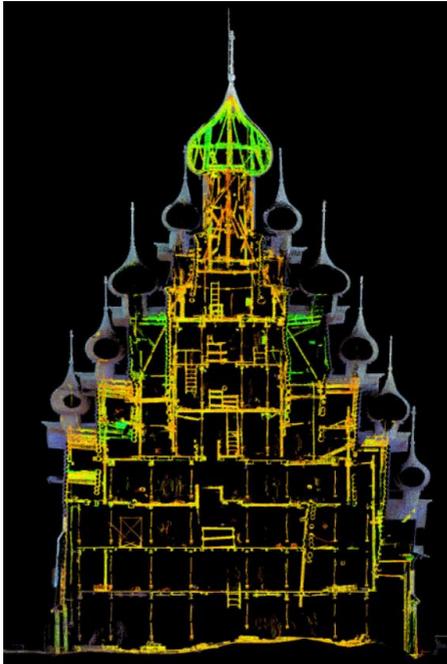

Die Anwendung von Punktwolken in der Sanierungsplanung am Beispiel der Christi Verklärungskirche Kishi

Point clouds as a practical aid in the preservation of monuments explained at the Church of the Transfiguration Kishi



Jens KICKLER, Wilfried KORTH¹, Uwe HOFFMANN
Beuth Hochschule für Technik, Berlin

¹ Wilfried Korth, gestorben 19.04.2019,

Dieser Aufsatz wurde im Gedenken an Wilfried Korth geschrieben. Wilfried Korth hat während eines gemeinsamen Forschungsaufenthaltes im November 2018 die Vermessungsarbeiten zum Monitoring initiiert und durchgeführt. Darauf folgend wurde die gemeinsame Fortführung der Forschungsarbeiten an der Christi Verklärungskirche mit einem weiteren Aufenthalt auf Kizhi im Juni 2019 geplant.

Wilfried Korth verstarb sehr plötzlich am 19.04.2019 im Alter von 60 Jahren. Die gemeinsam begonnenen Tätigkeiten sollen in seinem Sinne fortgesetzt werden. Leider müssen wir auf einen Freund mit seinen Ratschlägen, Ideen und Initiativen verzichten, dennoch hoffen wir die gemeinsam begonnenen Tätigkeiten auch in seinem Sinne fortführen und vollenden zu können.

Der zweite Forschungsaufenthalt wurde im Juni 2019 mit Unterstützung von Uwe Hoffmann, einem langjährigen Mitarbeiter von W. Korth durchgeführt.

1 Zusammenfassung

Punktwolken nehmen in der zeitgemäßen Abwicklung von Sanierungsvorhaben einen immer größeren Stellenwert ein. Trotz der verbesserten Technik im Bereich der Aufnahme, der vereinfachten Handhabung und der günstigeren technischen Geräte, ist der Nutzen der erstellten Punktwolken für den Ausführenden immer noch sehr begrenzt. Dies liegt insbesondere daran, dass teilweise die Datenerstellung aber insbesondere die Datenaufbereitung sehr aufwendig und mit speziellen Kenntnissen verbunden ist.

Da aber die Entwicklung, sowohl in der Aufnahmetechnik als auch in der Weiterverarbeitung der Daten, mittlerweile einen so hohen Standard erreicht hat, sind diese Techniken insbesondere für den Einsatz bei historischen Bauten von großem Nutzen und es ergeben sich den Anwendern völlig neue Möglichkeiten für die Planung als auch die Umsetzung von Rekonstruktions- und Sanierungsarbeiten.

In diesem Beitrag sollen diese Möglichkeiten an praktischen Beispielen dargestellt und erörtert werden. Hierbei wird besonders auf die Nutzung von Daten aus Punktwolken eingegangen. Dies erfolgt an dem Beispiel der Christi Verklärungskirche in Karelien (Nordrussland). Da es sich hierbei um einen historischen Blockbau von sehr großen Ausmaßen handelt, bei dem die Rundhölzer alle individuell Maße aufweisen, ist schon eine maßgenaue Dokumentation mit traditionellen Aufmaßtechniken nicht zu bewerkstelligen.

Ein wesentlicher Teil dieses Beitrags befasst sich mit der Analyse des Tragverhaltens dieses Bauwerks. Da bereits seit Anfang der 80-iger Jahre Entwürfe zur Ertüchtigung von Teilen des oberen Teils dieses Kirchbaus gab, wird sowohl theoretisch als auch praktisch hinterfragt inwieweit diese Zusatzkonstruktionen sinnvoll und notwendig sind. Dies erfolgt auch der Grundlage von statischen Berechnungen und der Auswertung von historischen und neuen Messdaten der ursprünglichen als auch restaurierten Konstruktion.

Mit diesem Beitrag kann konkret aufgezeigt werden, wie die Analyse von Punktwolken bei statischen Problemstellungen zu Analyse und damit zum Erhalt von historischen Bauweisen beitragen kann.

Abstract

Point clouds are being used more and more for everyday problems and are increasingly being created and used directly by practitioners. Here, previous difficulties in the area of creation and registration of point clouds are a thing of the past and point clouds can be created very easily with the help of laser scans or photogrammetry. Further processing and use, on the other hand, are often associated with many difficulties, which often severely limit the application of this technology. This contribution shows at the example of the Church of the Transfiguration (Kishi) how the point clouds can be used to solve real restoration problems and what benefits result for the executors and planners.

1. Einleitung

Bei dem hier vorliegenden Projekt handelt es sich um einen außergewöhnlichen Holzbau, dies gilt in Bezug auf seine Größe, die einzigartige Konstruktion und des Alters.

Wie sich während der Restaurierungsarbeiten zeigte, hat dieser Kirchenbau hat auch bis heute nicht alle Geheimnisse insbesondere in Bezug auf das Tragverhalten preisgegeben und es ist selbst mit den modernsten statischen Methoden nicht gelungen das komplexe Tragverhalten mathematisch exakt nachzuvollziehen. Die Nachweise alle Bauteile entsprechend den derzeit gültigen Holzbaunormen (sowohl die russische Norm/ GOST als auch europäischen Euro-code Normen) sollten nach der Auffassung des Verfassers nicht erfolgen, da das Trag- und Verformungsverhalten hiermit nur unzureichend abgebildet und überprüft werden kann. Dies liegt hauptsächlich daran, dass sich Normen auch auf eine irgendwie geartete Normierung beziehen – und dieser einmalige Bau irgendwie normierten Bauteile oder Bauweisen aufweist. Dennoch will dieser Beitrag aufzeigen, wie derartig Bauwerke, welche oft von Ingenieuren als rechnerisch nicht standsicher oder nicht nachweisbar angesehen werden, nachvollziehbar als standsicher nachgewiesen werden können. Hiermit soll beispielhaft dargestellt werden, dass bei einem guten Monitoring durchaus auf sogenannte normgerechte Verstärkungsmaßnahmen verzichtet werden kann.

Es handelt sich hierbei um einen Grundsatzstreit:

Ist ein historisches Gebäude nur standsicher, wenn der rechnerische Nachweis dies aufzeigt, oder kann ein historisches Bauwerk allein durch eine ausreichende Standzeit (z. B. mehr als 200 Jahre) ebenfalls als standsicher angesehen werden?

2 Beschreibung des Objektes in Bezug auf die Problemstellung des Tragverhaltens

Bei der Christi Verklärungskirche handelt es sich um einen historischen Blockbau außergewöhnlicher Größe. Das Bauwerk wurde vor über 300 Jahren erstellt und hat ca. 250 Jahre ohne Veränderungen in der Tragkonstruktion gestanden. Aufgrund von Zersetzungen einiger tragender Holzelemente wurden in den 80ziger Jahren des 20zigsten Jh. Unterstützungsmaßnahmen ergriffen um einen möglichen Einsturz zu verhindern. Seit ca. 7 Jahren wird das gesamte Bauwerk vollständig restauriert. Hierbei wurden und werden alle Elemente entnommen, einer Substanzprüfung unterzogen und gemäß der historischen Bauweise instandgesetzt, ergänzt oder bei gutem Zustand unverändert wieder eingebaut. Das bedeutet, dass die gesamte Restaurationsarbeit sich an den historischen Konstruktionen orientiert und das Bauwerk vom Tragverhalten wieder auf den Erbauungszustand zurücksetzt.

2.1 Statische Problembeschreibung

Aufgrund von massiven Schädigungen in der Holzkonstruktion musste die Kirche in den späten 70ziger Jahren des letzten Jahrhunderts geschlossen werden. Im Innenraum wurde ein Stahlgerüst zu Stabilisierung eingebaut um damit einem möglichen Einsturz vorzubeugen.

Gleichzeitig wurden im oberen Gebäudebereich (Verjüngungen der 8-Eckform bis zur zentralen großen Zwiebelkuppel, Abb. 1) auf der Höhe von ca. 20m größere Verformungen festgestellt.

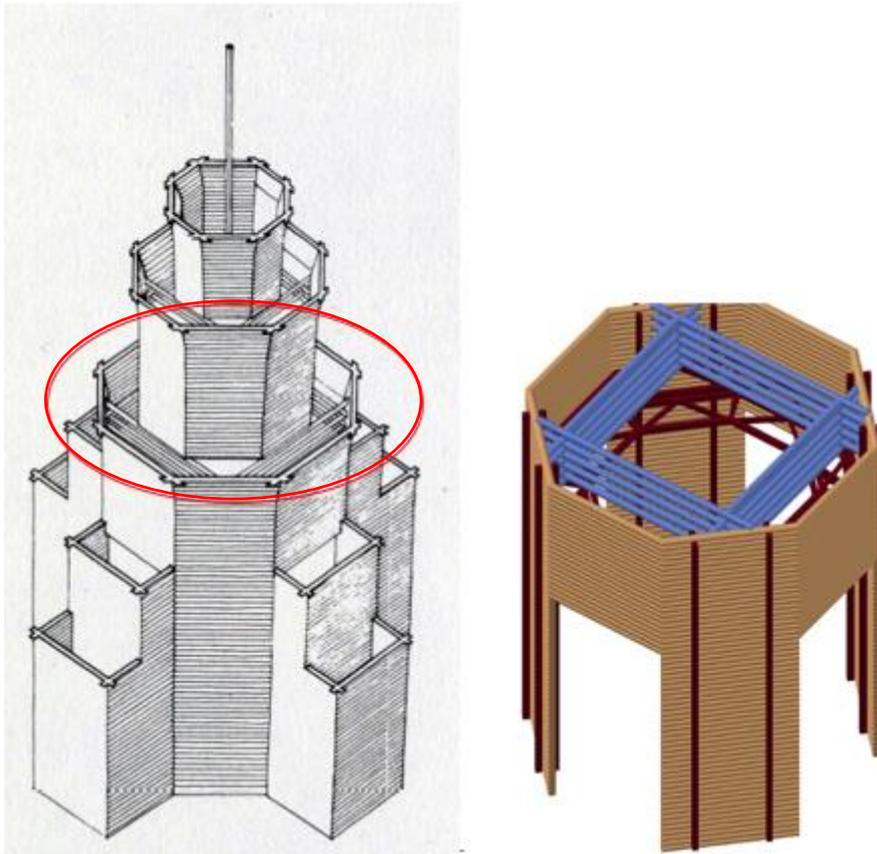


Abb. 1 Verjüngung mit Abfangbalken, Weiterleitung auf die 4 tragenden Außenwände

Für die Ursache dieser starken Verformungen wurde eine grundsätzlich nicht tragfähige Gesamtkonstruktion angenommen. Aus diesem Grunde wurden über einen Zeitraum von ca. 20 Jahren zahlreiche Sanierungsvarianten entworfen, welche die angeblich unzureichende Ursprungsstruktur ertüchtigen sollten. Bei keiner dieser Varianten wurde eine Berechnung, der gesamten historischen Konstruktion durchgeführt, alle Verstärkungsvarianten nehmen ohne entsprechende Nachweise an, dass die historische Bauweise von vornherein keine ausreichende Tragfähigkeit besaß. Durch eine stark vereinfachte Modellierung und Berechnung von einzelnen Bereiche der Ursprungsstruktur wurde dies begründet (vgl. Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Die einfache Schlussfolgerung lautete:

Wenn es sich mit den heutigen Normen nicht nachweisen lässt, kann es auch nicht tragfähig sein – dieser Ansatz wird diesem historischen einmaligen Bauwerk, welches über 250 Jahre ohne Schäden allen Einwirkungen standgehalten hat, nicht gerecht.

3 Tragverhalten des historischen Kirchenbauwerks

Die Tragkonstruktion der Christiverklärungskirche wurde auch bei vielen ähnlichen Kirchenbauwerken aus dieser Zeit angewendet, leider sind diese überwiegend nicht mehr erhalten. Somit handelt es sich um einer der letzten im Originalzustand erhaltenen Blockbaukonstruktionen dieser Art. Diese Konstruktionsart hat sich über Jahrhunderte entwickelt und fußt damit auf umfangreichen Erfahrungswerten, die sich bewährt haben und kontinuierlich optimiert worden sind. Grundsätzlich ist es vom Lastabtrag ein relativ klares Konzept, dies ist in der Abb. 1 gut zu erkennen. Da sich die tragende 8-Eck Konstruktion zum zentralen Zwiebelturm nach oben hin zweimal verjüngt, wird diese durch 4 bis 5 quer gespannten Rundhölzern abgefangen (Abb. 1 links). Diese Lasten werden dann in die 4 durchgehenden Außenwänden (Abb. 1 rechts) weitergeleitet.

Für genau diese Bereiche sollten gemäß der in Abschnitt 2.1 dargestellten Sachverhalte, ergab sich die Annahme einer nicht ausreichenden Tragfähigkeit. Dies ist soweit nachvollziehbar, wenn an dieses Bauwerk die normierten Bemessungsgrundsätze für neuzeitliche Holzbauwerke angesetzt werden und alle das Tragverhalten zusätzlich unterstützende Faktoren nicht berücksichtigt werden.

Wird beispielweise die Last aus der oberen Kuppelkonstruktion als Streckenlast auf die querspannenden Balken abgelegt, dann ergibt sich hier rechnerisch eine deutliche Überlastung – dies entspricht aber nicht dem wirklichen Lastabtrag und diese rechnerische Überlastung ist damit in dem nicht zutreffenden Berechnungsansatz begründet. Ebenso verhält es sich bei einem Nachweis der unteren Balkenlage bei den vier lastabtragenden Blockwänden (vgl. Abb. 1 rechts), auch hier kommt es bei sehr vereinfachten Berechnungsansätzen zu Überbeanspruchungen der unter Balkenlage.

Dieses Vorgehen steht aber in einem direkten Widerspruch zu den Erfahrungswerten dieser Bauwerke – da diese ohne erkennbare Schäden mehrere Jahrhunderte ihre Tragfähigkeit unter Beweis gestellt haben.

Damit die grundsätzliche Problematik beschrieben – da der rechnerische Nachweis nicht gelingt, kann das Bauwerk auch nicht tragfähig sein.

Aber was ist mit den ähnlichen vielen historischen Bauwerken, welche niemals nachgerechnet wurden – sind diese auch nicht tragfähig sobald diese nachgerechnet werden?

Diese Fragestellung wird im Folgenden genauer erörtert und es wird ein möglicher Lösungsansatz dargestellt, der auch neuzeitlichen Anforderungen genügt.

4 Bauaufnahme und Ursachenermittlung

Für die Ursache dieser starken Verformungen wurde eine unzureichende Abfangkonstruktion angenommen. Vor der detaillierten Sanierungsplanung wurden zahlreiche Sanierungsvarianten entworfen, welche die angeblich unzureichende Ursprungskonstruktion ertüchtigen sollten. Einige dieser Varianten beruhten auf statischen Berechnungen, andere waren rein konstruktive Vorschläge.

Da keine der Varianten den Auftraggeber und auch die Spezialisten des ICOMOS vollständig überzeugten, besteht trotz voranschreitender Sanierungsarbeiten immer noch Unklarheit über die Ursachen der großen Verformungen vor der Sanierung.

Während der Sanierungsarbeiten wurden aber umfangreiche Schädigungen der tragenden Rundhölzer festgestellt, diese beruhen ausschließlich auf Verfaulungen und Zersetzungen auch im Bereich von stark belasteten tragenden Elementen (vgl. Abb. 2). Ursache hierfür ist mit sehr großer Wahrscheinlichkeit eine lang andauernde Feuchteinwirkung, dies ist bei einer Standzeit von ca. 300 Jahren nicht verwunderlich.

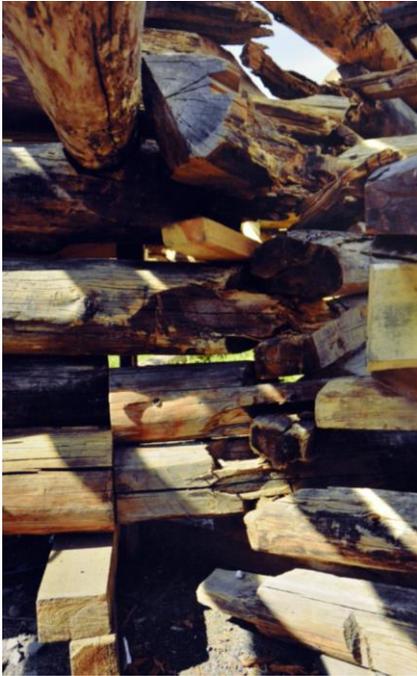


Abb. 2 Geschädigte Eckverbindung

4.1 Punktwolken und Vorstellung der Projekte

Punktwolken sind seit mehr als 10 Jahren fester Bestandteil der Vermessungstechnik und der Bauaufnahme. Bei der Christi Verklärungskirche auf Kizhi (Nordrussland, vgl. Abb. 3 links) wurden in den Jahren 2006 und 2010 ein Laserscan durchgeführt (vgl. Abb. 4). Weiterhin wurde dort seit den 1980er Jahren das gesamte Objekt mit Theodoliten und Tachymetern kontinuierlich vermessen um die Verformungen aufgrund des schlechten Zustands der Kirche festzuhalten.

Ab dem Jahre 2011 begannen die Restaurierungsarbeiten an der Kirche, welche mit sehr hohem Aufwand durchgeführt wurden. Das gesamte Bauwerk wurde angehoben und die einzelnen Rundhölzer (Blockbauweise) entnommen, instandgesetzt bzw. ausgetauscht und wieder eingebaut (vgl. Abb. 5).

Zurzeit werden die Restaurierungsarbeiten abgeschlossen und im März soll das vor ca. 40 Jahren innen eingebaute Stahlgerüst entfernt und die Innenausstattung (Abb. 3 rechts) wieder eingebaut werden.



Abb. 3 Kizhi Pogost Aufnahme 1975 (außen und innen) vor der Schließung (Opolovnikov 1977)

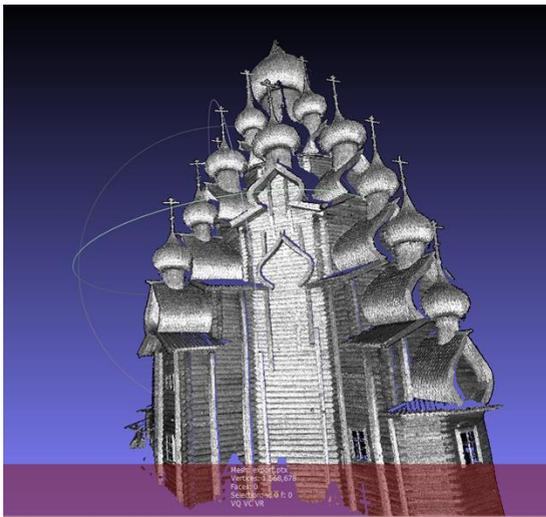


Abb. 4 Laserscan der Verklärungskirche von 2006

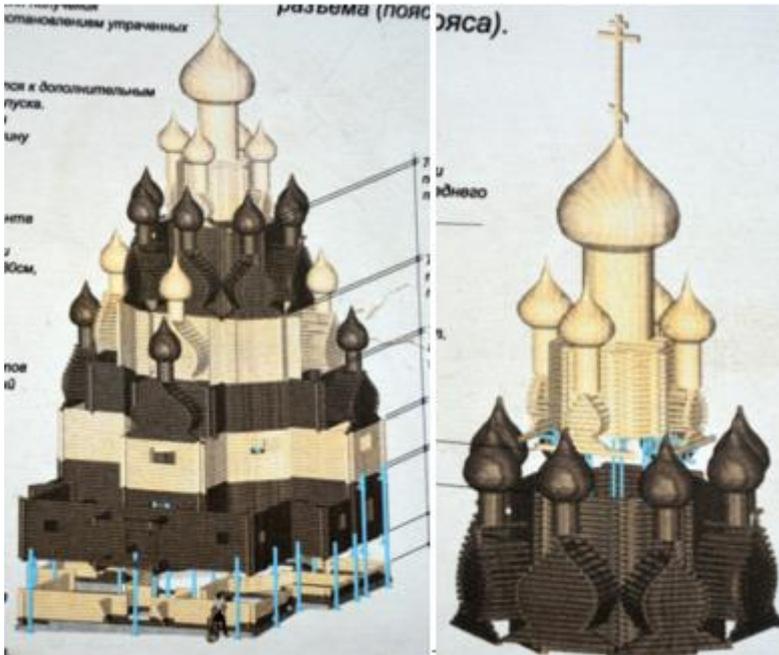


Abb. 5 Liftingverfahren, Prinzipskizze (Ausstellung Zimmererzentrum Kizhi 2018)

Warum sind diese Sachverhalte für die modernen Vermessungsmethoden (insbesondere das Laserscannen) von Bedeutung? Zu keinem Zeitpunkt der Restaurierungsarbeiten wurde weder auf die Laserscandaten als auch auf diese Aufmaßdaten zurückgegriffen. Die Gründe hierfür sind teilweise den Umbrüchen in Russland und der Sowjetunion zu suchen, es gibt aber einige grundsätzliche Sachverhalte, die die Nutzung dieser Vermessungsdaten für die praktischen Anwendungen nicht zugänglich machen. Dieser Punkt soll im Folgenden noch genauer analysiert werden und aufzeigen wie dies für Sanierungskonzepte nutzbar gemacht werden kann.

5 Voraussetzungen für dem Einsatz von Laserscandaten

Grundsätzlich ist die Vermessungstechnik schon seit Längerem in der Lage jegliche Art von Aufmaßdaten in beliebiger Genauigkeit zu erstellen – der Aufwand kann hierfür aber durchaus sehr groß werden.

Die Problematik beginnt bei der Bauauftragung: Ohne, dass überhaupt das genaue Ziel der Bauaufnahme vorab definiert worden ist, werden Vermesser hiermit beauftragt. Damit werden sehr viele Daten aufgenommen und erst hinterher wird überlegt wie diese Daten verwendet werden können und sollen. Bei einfachen Abfragen seitens der Restauratoren bei diesem Projekt, z. B. wie groß waren die Setzungen des oberen Gebäudeteils im Zeitraum von 1980 – 2010 waren, konnte nicht mehr festgestellt werden wann welche Aufmaße wo erfolgt sind.

Bei weiteren Abfragen zu den Ausbeulungen in den Wänden vor der Rekonstruktion wurde mitgeteilt, dass die Laserscandaten 2006 und 2010 erstellt worden sind, welcher aber nicht

genutzt werden können, da keiner diese Daten lesen könne. Eine Überprüfung 2018 ergab, dass es sich um Datenformate der Firma Leica handelte, die z. B. mit der Software Cyclone gelesen und ausgewertet werden können. Dieses Programm lag aber bei den Restauratoren in Russland nicht vor.

Aus den geschilderten Sachverhalten ergeben sich die ersten wichtigen Grundsätze, welche zu einem geringeren Aufwand und einem höheren Nutzen der Aufmaßdaten führen.

- Genaue Zieldefinition der Bauaufnahme – durchgeführt durch die Fachleute für die Nutzung der Daten.
- Festlegung wo, wie die Daten gespeichert und den Nutzern zugänglich gemacht werden sollen, damit eine von dem für die Datenaufnahme verantwortlichen Personen unabhängige Nutzung erfolgen kann.

6 Nutzung der Datenbasis für das statische Sanierungskonzept

6.1 Hintergründe zu den möglichen Ursachen der Verformungen

Alle Konzepte für die Unterstützungsmaßnahmen gingen und gehen davon aus, dass die historische Konstruktion nicht ausreichend tragfähig war – als Beleg wurden die vorhandenen Verformungen gewertet.

Hierbei konnte aber nicht zu der Verformungsgeschichte gesagt werden, d.h. es kann nicht nachvollzogen werden wann die Verformungen eingetreten sind. Diese Kenntnisse wären aber wichtig für die Festlegung der eigentlichen Ursache für das Absacken des oberen Achtecks.

6.2 Welche Ursachen kommen in Frage:

Variante 1:

Die Konstruktion ist in der historischen Art und Ausführung nicht ausreichend tragfähig gewesen

Variante 2:

Die Konstruktion war in der historischen Art und Ausführung ausreichend tragfähig, das Absacken resultierte aus den starken Feuchteschäden

Variante 3:

Die Konstruktion war teilweise zu schwach ausgelegt, grundsätzlich war die Tragfähigkeit gesichert, entspricht aber nicht den Sicherheitsansprüchen von heutigen Nachweismethoden.

Im Vorfeld der Analyse zu möglichen Verstärkungs- und Unterstützungsmaßnahmen, wurde kein rechnerischer Nachweis über die Tragfähigkeit der Gesamtkonstruktion unter Berücksichtigung aller Elemente der historischen Konstruktion (und eines räumlichen Tragverhaltens) durchgeführt. Alle bisher vorliegenden Berechnungen gehen von sehr stark vereinfachten Annahmen aus, welche nur mit zusätzlichen Maßnahmen die Standsicherheit nachweisen lassen.

6.3 Auswertung der Laserscandaten von 2010

2010 wurde der gesamte Kirchenbau von innen und außen gescannt und zu einer zusammenhängenden Punktwolke zusammengeführt. Dies erfolgte mit einem Leicasystem und es liegen die Daten in den Originalformaten vor. Die Daten können mit dem von der Firma Leica herausgegebenen Programm Cyclon gelesen und analysiert werden.

Die Datenanalyse erfolgte in der Beuth Hochschule durch Prof. W. Korth und die Ergebnisse wurden auf dem internationalen Symposium in Berlin (russischen Haus) im Feb. 2019 vortragen.

6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Vorgehensweisen

In einem ersten Schritt wurden die Daten der Punktwolke in Cyclon geladen und geöffnet. Dann wurde der betroffene Bereich herausgefiltert und in Form einer herausgeschnittenen Teilpunktwolke zu weiteren Analyse bereitgestellt (vgl. Abb. 6).

Da die Scandaten von 2010 stammten, waren diese noch nicht direkt mit RGB-Farben versehen, so dass es keine fotorealistische Darstellung ergibt, der räumliche Eindruck ist aber gleichwertig.

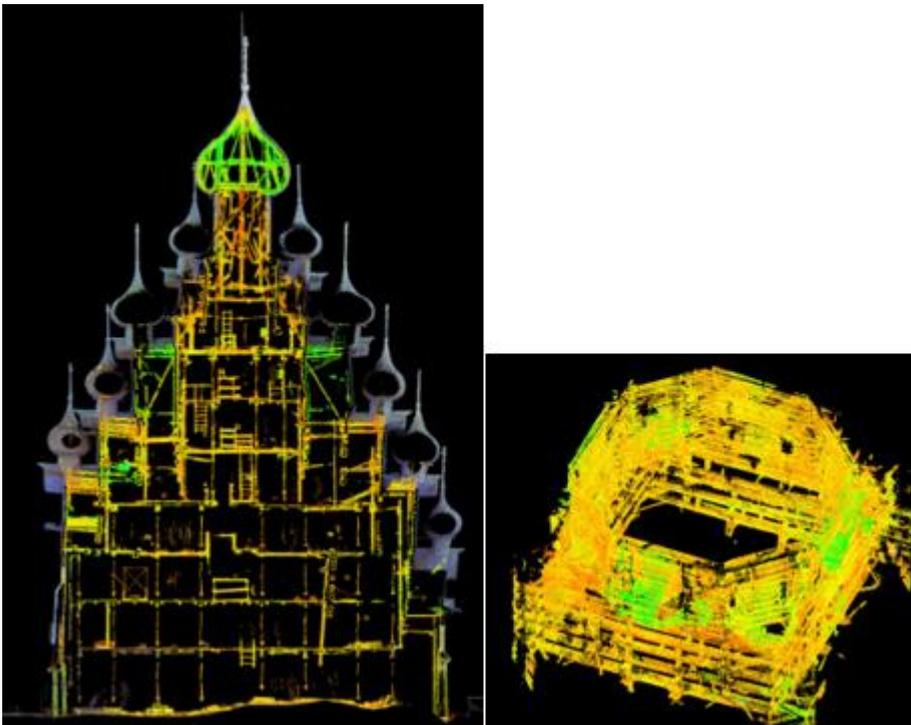


Abb. 6 Schnitt durch die Gesamtpunktwolke li, gefilterter Teilbereich

Der Ausgeschnittene Bereich der betroffenen Balkenlage wurde analog zu einer realen Vermessung der Bauteile vor Beginn der Sanierungsarbeiten analysiert, d.h. es können z. B.

die Balkenquerschnitte und die Verformungen relativ zu anderen Bauteilen herausgemessen werden. In dem hier vorliegenden Fall wurden alle vier Seiten der Abfangbalken in Bezug auf die Durchbiegung analysiert.

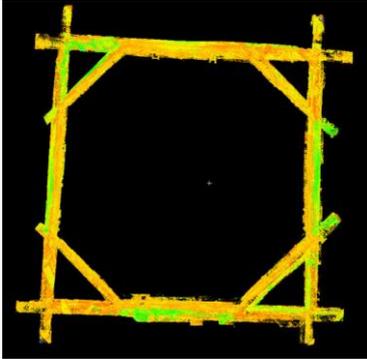


Abb. 7 Draufsicht

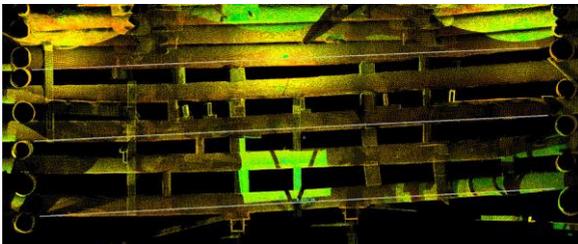


Abb. 8 Ansicht Ost (Durchbiegung 9,7cm)

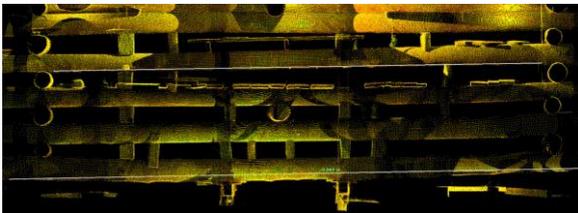


Abb. 9 Ansicht Nord (Durchbiegung 8,4cm)

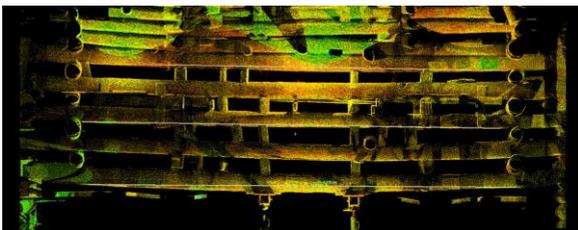


Abb. 10 Ansicht Süd (Durchbiegung 11cm)

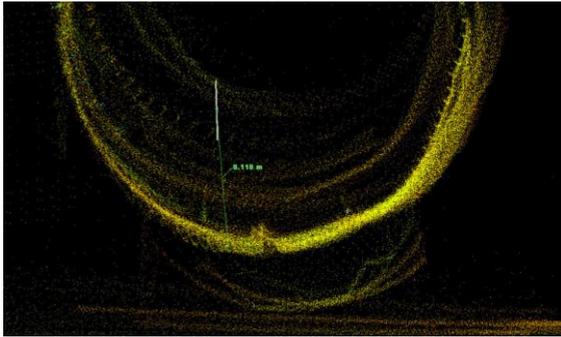


Abb. 11 Detail Balken mit Verschiebung Süd (Durchbiegung 11cm)

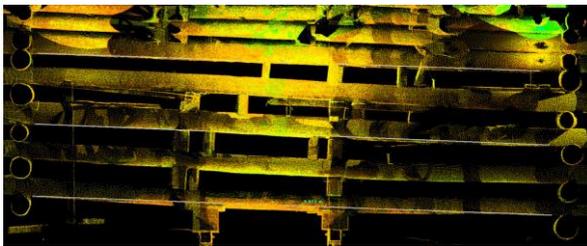


Abb. 12 Ansicht West (Durchbiegung 7,1cm)

Auf den Abb. 8 - Abb. 12 ist ebenfalls zu erkennen, dass die übereinanderliegenden Abfangbalken auch vor der Sanierung zu Zwischenhölzer für den vertikalen Lastabtrag gekoppelt worden sind. Diese Hölzer wurden wahrscheinlich nicht so systematisch eingebracht, wie dies gemäß ingenieurmäßigen Vorgaben erfolgt wäre, der Effekt kann aber als vergleichbar angesehen werden, da sich die übereinanderliegenden Rundhölzer nur gemeinsam vertikal durchbiegen können.

Die in der Punktwolke vorgefundenen Durchbiegungen liegen in einem Rahmen, der auch nach heutigen Bemessungsvorschriften als vertretbar eingestuft werden kann.

Die Durchbiegungen liegen bei ca. $1/150$ von der Stützweite. Wenn diese Verformungen um die Langzeitverformung (Kriechen) reduziert werden (ca. 60% - 100% der elastischen Verformungen), dann ergibt sich eine Durchbiegung die mit heutigen Normvorgaben vergleichbar ist.

Überprüft man die Elemente der ursprünglichen Konstruktion, welche aufgrund des intakten Zustand wiederverwendet worden sind, ist jetzt erkennbar, dass diese geringere Verformungen/ Durchbiegungen aufweisen, als dies in der Punktwolke erkennbar war. Diese Ergebnisse sollen im Folgenden genauer analysiert werden.

7 Statische Berechnung mit EDV-Berechnungsverfahren

Zurzeit sind die Restaurationsarbeiten derart fortgeschritten, dass der gesamte Bereich ohne zusätzliche Verstärkungsmaßnahmen analog zur historischen Konstruktion wiederaufgebaut worden ist. Weiterhin ist die vollständige Belastung wieder vorhanden. Das heißt, wir haben einen Zustand analog zum Ursprungszustand. Im Folgenden wird versucht die vorhandenen Verformungen mit statischen Berechnungsmethoden nachzuvollziehen. Es gab einfache Berechnungsansätze, welche eine Durchbiegung von ca. 20cm in diesem Bereich vorhersagten (vgl. Abschnitt 8) – bei einer derartigen Durchbiegung wären Verstärkungsmaßnahmen unbedingt notwendig gewesen - dies hat sich trotz vollständig vorhandener Last nicht eingestellt.

Die vor Ort dokumentierten Verformungen lagen 2019 bei zwischen 2-4cm.



Abb. 13 Historische Aufnahme von 1916 (Quelle unbekannt)

Soweit historischen Fotografien vorliegen sind dort ebenfalls keine größeren Deformationen nach einer Standzeit von ca. 200 Jahren erkennbar (vgl. Abb. 13, obere Teil wirkt gerade).

Die im Abschnitt 8 durchgeführten Berechnungen sollen diese Diskrepanz erklären und damit nicht notwendige Veränderungen in der Konstruktion dieses historisch einmaligen Bauwerks vermeiden helfen. Damit soll auch begründet werden mit welcher Qualität diese historischen Bauwerke erstellt worden sind.

8 Vorgehensweise bei den durchgeführten Berechnungen

Als ersten ist zu klären, wie groß die wirklichen Auflasten für den oberen Bereich sind, dies lässt sich für die ständige Last relativ genau abschätzen, da die Durchmesser und Längen der verwendeten Holzelemente bekannt sind. Unter Berücksichtigung einer ausgleichsfeuchte von ca. 20% rel. Holzfeuchte ergeben sich Lastannahmen von ca. 60t ($\approx 600\text{kN}$). Mit einem Teilsicherheitswert von 1,35 (ständige Lasten) ergeben sich pro Seite:

$$(1,35 \times 600\text{kN}) : 4 \approx 200 \text{ kN (20t)}$$

Für diese Berechnung wird als erste Vereinfachung davon ausgegangen, dass die räumlichen Effekte keine Auswirkungen haben und das System auf eine Seite (ein Viertel des Gesamtsystems) reduziert werden kann.

Der sehr stark vereinfachte Ansatz geht davon aus, dass die oberhalb liegenden Balken keine Tragwirkung ausbilden und nur als Auflast zu betrachten sind. Die 5 lastabtragenden Balken liegen lose aufeinander und sind nicht miteinander verbunden.

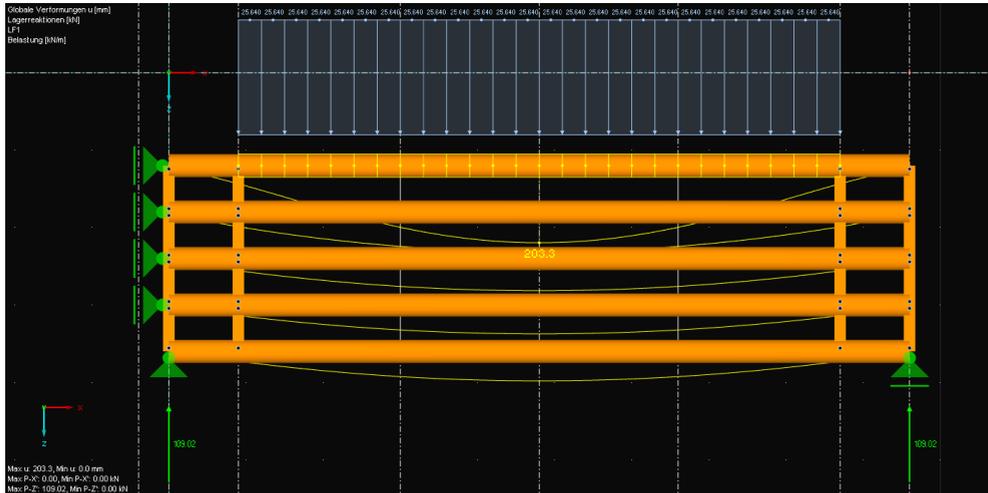


Abb. 14 Belastung ca. 25kN/m Durchbiegung ca. 20cm

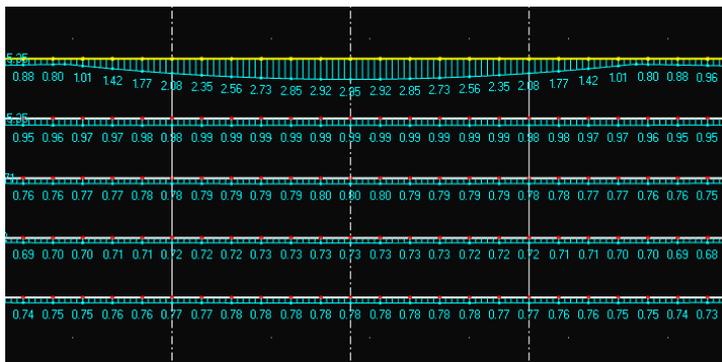


Abb. 15 Spannungsauslastung im mittleren Bereich (ca. 3fache Überschreitung)

Dieser vereinfachte Ansatz würde zu der Annahme führen, dass aufwendige Unterstützungsmaßnahmen erforderlich sind (vgl. Abb. 14 u. Abb. 15).

Genauere Berechnungsansätze

Hierbei werden die oberhalb liegenden Hölzer lose aufgelegt. Zwischen den Hölzern wird die Last direkt von einem Rundholz auf das nächste übertragen – dies entspricht den Blockwänden oberhalb. Damit ergibt sich eine wesentlich günstigere Lasteinleitung in die Abfangkon-

struktion und eine stark reduzierte Durchbiegung von 8,5cm der übertragende Zwischenhölzer (vgl. Abb. 16), so dass die Auflast auf alle 5 Rundhölzer verteilt wird. Dies entspricht dem sichtbaren Modell, wie es vor der Sanierung erkennbar war (vgl. z. B. Abb. 8).

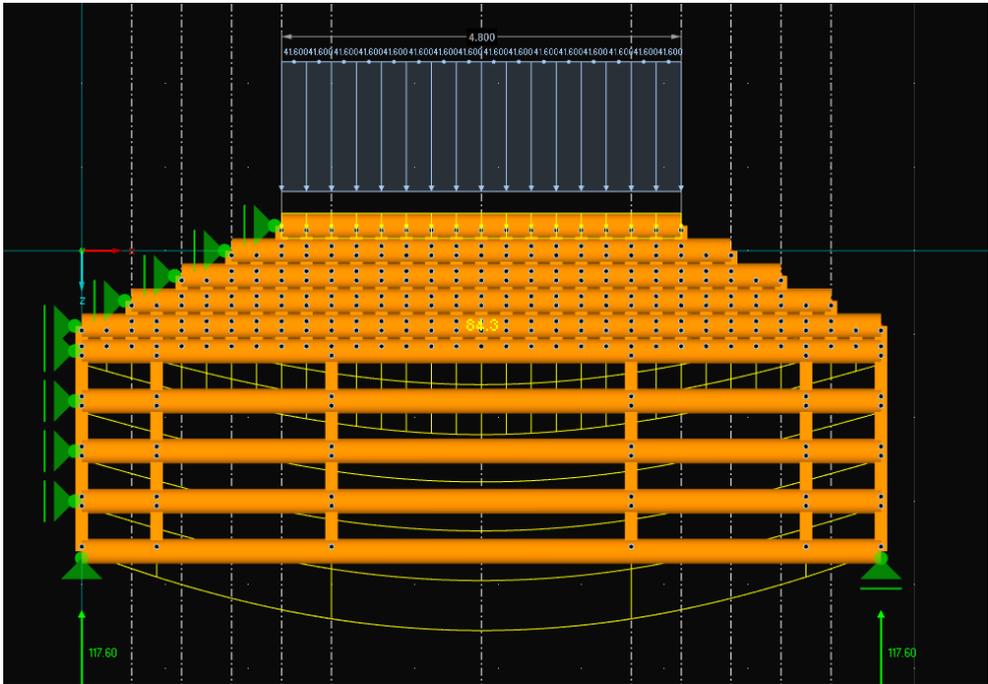


Abb. 16 Berücksichtigung der Balkenlagen oberhalb der Abfangkonstruktion (Durchbiegung 84,5mm)

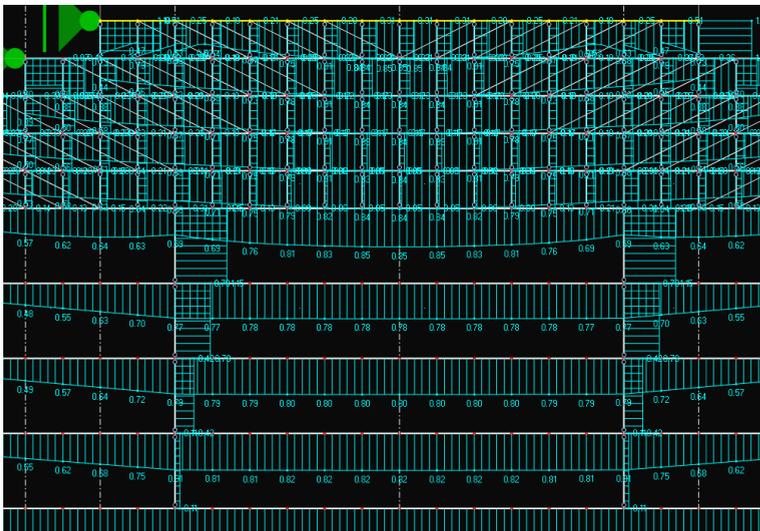


Abb. 17 Auslastung Biegespannung bei max 85%

Es zeigt sich, dass eine Modellierung der aufliegenden Balkenlagen dem realen Tragverhalten sehr nahekommt. Da die vor Ort gemessenen Durchbiegungen bei ca. 50% der berechneten liegen, kann davon ausgegangen werden, dass der reale Lastabtrag noch günstiger ist.

9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es handelt sich bei diesen unterschiedlichen Berechnungen immer um Modelle, die nicht alle Einflüsse die an dem wirklichen Bauwerk vorhanden sind berücksichtigen. Dennoch zeigen diese Modellrechnungen recht gut, welche Auswirkungen durch welche Maßnahmen zu erwarten sind, ohne dass diese exakt so eintreten werden. Aufgrund der Gutmütigkeit von Holzkonstruktion (auch Schläue des Materials genannt) werden Spannungsspitzen oder extreme Durchbiegungen geglättet, also in der berechneten Größe nicht in vollem Umfang auftreten. Es kommt zu Kräfteumlagerungen, die zu gleichmäßigeren Kräfteverteilungen im Gesamtsystem führen. Aus den unterschiedlichen Ansätzen kann aber das wirkliche Tragverhalten gut abgeschätzt werden und es wird damit die Tragfähigkeit grundsätzlich (nach allg. gültigen Berechnungsansätzen) nachgewiesen. Das System hält bei allen 5 Varianten, das System ist also rechnerisch tragfähig und hat in allen Ansätzen rechnerisch Lastreserven (wenn die wirklichen Lasten höher sein sollten als die hier angesetzt ist das System trotzdem tragfähig).

Damit ist aufgezeigt, dass das 300-jährige Bauwerk bei intakten Bauteilen immer standsicher (tragfähig) gewesen ist.

10 Schlussfolgerungen aus den unterschiedlichen Ansätzen

Die historische Konstruktion ist unter Berücksichtigung der Vertikalstäbe in den Drittpunkten ohne weitere Maßnahmen auch gemäß heutiger Berechnungsvorschriften tragfähig (Spannungs- und Stabilitätsnachweise sind erfüllt).

Die sich hieraus rechnerisch ergebende Durchbiegung variieren je nach Berechnungsmodell zwischen 70mm – 200mm. Die wirklich gemessenen Durchbiegungen sind geringer, das zeigt, dass die Berechnungsmodelle nicht alle möglichen Einflussfaktoren ausreichend berücksichtigen. Unter Berücksichtigung von Reibung im oberen Bereich ergeben sich rechnerische Durchbiegungen von ca. 60mm, dies entspricht den heutigen Messungen am Objekt.

11 Fazit: Punktwolke als Datenbasis

An dem dargestellten Beispiel kann abgelesen werden, wie sinnvoll eine maßgenaue Dokumentation vor dem Beginn von Sanierungsarbeiten ist und welche wichtigen Erkenntnisse sich ergeben können, welche im Vorfeld gar nicht einbezogen worden sind.

Die Punktwolke stellt eine grundlegende Dokumentationsbasis für vielfältige Analyse- und Sanierungsplanungen dar. Es ist vereinfacht gesagt so, als ob man im Nachhinein nochmals das unsanierte Bauwerk betreten könnten.

Weiterhin kann die Punktwolke auch zu Planungszwecken von Sanierungen genutzt werden – es brauchen nicht alle Maße explizit aufgenommen werden, da alle Maße in der Punktwolke

dokumentiert worden sind. Hier ist von großer Bedeutung, dass die Nutzer die Dokumentationen eigenhändig oder in Zusammenarbeit erstellen. D. h. dass z. B. die Punktwolken mit ev. zusätzlichen Informationen z. B. exakte Tachymetermessungen für statische Analysen ergänzt werden um zusätzlich Analysen durchführen zu können.

Eine einfache Lösung, wie es teilweise von Herstellern dargestellt wird, können auch die Punktwolken bisher nur eingeschränkt leisten. Die vereinfachte Handhabung und die günstigeren Gerätepreise machen diese Technik für einen breiteren Einsatzbereich zugänglicher, so dass der Einsatz dieser Technik zukünftig einen wesentlich größeren Stellenwert haben wird. Der reale Aufwand ist aber bei der Auswertung der Daten immer noch sehr hoch. Dies liegt nicht an den technischen Möglichkeiten der Geräte, sondern meistens in der Möglichkeit der einfachen Datennutzung bzw. Weiterverarbeitung. Eine Lösung für diese Problematik liegt in einem einfacheren Zugang zu Punktwolken. Hierin besteht noch weiterer Forschungs- und Schulungsbedarf. Die Punktwolken selbst stellen eine sehr gute Art der Datenarchivierung dar, da diese schnell erzeugt und einfach gespeichert werden können. Im Endeffekt ist die Punktwolke ein farbiges 3D-Modell mit exakten Maßen. Dieses Datenarchiv muss viel intensiver von den unterschiedlichen Fachleuten genutzt werden, ohne dass weitere Überführung oder Umarbeitung für den jeweiligen Einsatzbereich erforderlich sind. Für beispielsweise Statiker oder Architekten kann dann auf eine aufwendige zeichnerische Darstellung verzichtet werden (vergl. Beispiel 1), es werden dann nur die im Detail notwendigen Bereiche genutzt und durch entsprechende Angaben des Fachplaners ergänzt. Da elegante an diesem Vorgehen ist es, dass alle Beteiligten mit einer zentral erstellten Datenbasis – der Punktwolke – sich in dem Bauvorhaben orientieren und diese dort bearbeiten. Damit bleiben auch immer der Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt (Datum des Scans) und die Ergänzungen der Fachplaner unabhängig voneinander erhalten.

12 Literatur

- MARTIN PERAK (2018): Sanierungsplanung eines historischen Fachwerkhauses, Bachelorarbeit der Beuth Hochschule für Technik Berlin.
- EMS – VECHTE – STIFTUNG (2018): Bestandsaufnahme zum Bauzustand nach Durchführung der Beräumungs- und Sicherungsarbeiten
- DR. DIETRICH MASCHMEYER (2017): Das Haupthaus des Hofes Korthues in Ohne, ein bedeutendes Denkmal bäuerlicher Kultur der Region, Ems – Vechte – Stiftung
- BORCHARDT, BENJAMIN. (2016): Möglichkeiten der Erstellung und Weiterverarbeitung von dreidimensionalen Messdaten in CAD/BIM-Systemen im Bauwesen. 2016.
- HARTKE, NIKLASSS (2016): Erstellung und Verarbeitung Laserscans für die Verwendung im historischen Holzbau, Bachelorarbeit, Beuth Hochschule für Technik, Berlin
- RACHMANOV, VALDIMIR (2014): Sanierungsplanung Christi Verklärungskirche, Kizhi, Teil 2, Buch 9-1, (russisch)
- SUKALE, J. U. NEUMANN, S. (2013): Überwachungsmessung und terrestrisches Laserscanning an der Verklärungskirche in Kischi, Bachelorarbeit der Beuth Hochschule für Technik Berlin.
- OPOLOVNIKOV, A. V. (1977): Russischer Norden, Stroijisdat, (Russischer Originaltext)