

Digital Blockhouse Fabrication

Digitale Entwurfs- und Fabrikationsmethoden
für den Blockhausbau



Lukas Kirschnick
Weimar, 25.06.2020

Professur Informatik in der Architektur

Abstract

Der heutige Holzbau nutzt die Möglichkeiten computergestützter Fertigung, um mit standardisierten Holzmaterialien komplexe Entwürfe umzusetzen. Der hier verfolgte Ansatz hat zum Ziel, Baumstämme in ihrer Rohform zu verwenden. Im traditionellen Blockhausbau wird dies seit Jahrtausenden praktiziert. Die Stämme werden entrindet und aufeinander angepasst zu einer massiven Wand gestapelt. Dieser ressourcenschonende Ansatz erfordert allerdings ein großes handwerkliches Geschick. Um den Blockhausbau zu modernisieren und die Möglichkeiten computergestützter Fertigung und digitaler Planung auszuschöpfen, wurde eine alternative Prozesskette erprobt. Die geschlagenen Baumstämme wurden 3-D gescannt und anschließend digital weiterverarbeitet. Mithilfe eines eigens entwickelten Skriptes wurden die Baumstämme automatisch gestapelt und miteinander verschnitten. Die daraus gewonnenen 3-D Daten wurden anschließend dafür verwendet, den Maschinencode für die Bearbeitung der Baumstämme per CNC-Fräse zu generieren. Die hieraus entstandene Wand besteht aus perfekt ineinander greifenden Stämmen bei minimaler Bearbeitung.

Im Vergleich zu den im Sägewerk geschnittenen Stämmen könnten hiermit ca. 15–20 Prozent weniger Verschnitt anfallen. Die automatisierte Verarbeitung erlaubt es auch unregelmäßig geformte Baumstämme, Totholz und stark konisch zulaufende Stämme zu verwenden – eine Chance für mehr Nachhaltigkeit.

Die Digitalisierung des Baumaterials ermöglicht eine hohe Individualisierbarkeit, schon der Entwurf basiert auf Länge und Durchmesser der verfügbaren Baumstämme. So können die Maße der individuellen Stämme entnommen und für eine optimale Weiterverarbeitung mit minimalem Verschnitt genutzt werden. Dieses neuartige Verfahren wurde vom gefällten Totholzbaum bis zum Prototypen einer Blockhauseckverbindung im Maßstab 1:5 erprobt. Die Präzision in der Fertigung und die Möglichkeiten der Automatisierung wurden dabei unter Beweis gestellt.

English Version

Today's timber construction utilizes the possibilities of computer-aided manufacturing in order to implement complex designs using standardized wood materials. The approach pursued here aims to use tree trunks in their raw form. This has been practised in traditional log house construction for thousands of years. The logs are debarked and stacked to form a solid wall. However, this resource-saving approach requires great craftsmanship. In order to modernize log house construction and to exploit the possibilities of computer-aided production and digital planning, an alternative process chain was tested. The felled tree trunks were scanned in 3-D and then digitally processed. With the help of a specially developed script, the logs were automatically stacked and cut together. The resulting 3-D data was then used to generate the machine code for processing the logs by CNC milling. The resulting wall consists of perfectly interlocking logs with minimal machining.

Compared to the logs cut in the sawmill, this could result in approximately 15-20 percent less waste. The automated processing also allows the use of irregularly shaped logs, dead wood and strongly tapered logs - an opportunity for more sustainability. The digitalization of the building material allows for a high degree of individualization; even the design can be based on the length and diameter of the available tree trunks. This allows the dimensions of the individual logs to be used for optimal further processing with minimal waste. According to the wall and roof configuration defined in the design, the tree trunks were placed automatically.

This novel method started with the felling of deadwood trees and ended with the fabrication of a log house corner joint prototype on a scale of 1:5. It confirmed the precision of the fabrication workflow and the possibilities of its automation.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	2
1. Einleitung	5
2. Digital Fabrication - State of the Art	6
3. Traditioneller Blockhausbau	9
3.1 Historie	10
3.2 Die Werkzeuge	10
3.3 Das Fundament	11
3.4 Die Wand	12
3.5 Die Zwischenwände	13
3.6 Das Dach	14
3.7 Aktueller Blockhausbau	15
4. Digital Blockhouse Fabrication - ein neuer Ansatz	17
4.1 Das Ausgangsmaterial Fichtenholz	18
<i>Neue Verwendung für Totholz</i>	19
4.2 Arbeitsabläufe	20
4.2.1 3-D Scanning	20
4.2.2 Aufbereitung der gescannten Meshes	23
4.2.3 Parametrik und digitale Planung	24
<i>Platzierung der Baumstämme</i>	24
4.2.4 Computergestützte Fertigung (CAM)	34
<i>Alternative Frässtrategie</i>	37
4.3 Herausforderungen	38
5. Zusammenfassung	39
6. Ausblick und Möglichkeiten der Weiterentwicklung	41
Weiterentwicklung der digitalen Prozesskette	41
Untersuchung von Holzfehlern	42
Skalierung	42
Konstruktion	43
Klimaschutz	45
Quellenverzeichnis	46
Literaturverzeichnis	49
Abbildungsverzeichnis	53

1. Einleitung

Der Holzbau ist prädestiniert dafür, von den Möglichkeiten digitaler Entwurfs- und Fertigungsmethoden zu profitieren. Holz ist ein Werkstoff, der vielseitig nutzbar ist. So erfüllt es als Baumaterial sowohl tragende als auch dämmende Funktionen. Holz ist im Gegensatz zu Stahl oder Beton ein nachwachsender Rohstoff. Außerdem trägt ein Gebäude aus Holz durch die dauerhafte Bindung von CO₂ zum Klimaschutz bei. Gleichzeitig lässt sich Holz gut bearbeiten und ermöglicht konstruktive Verbindungen ohne zusätzliche Hilfsmittel. Dieses Potenzial nutzt der traditionelle Blockhausbau seit Jahrtausenden.

Beim traditionellen Blockhausbau werden Baumstämme in ihrer Rohform verarbeitet. Dies ist eine sehr einfache Fertigungstechnik, der Baumstamm gelangt vom Wald direkt auf die Baustelle. Heutzutage wird diese Fertigungstechnik nur noch selten angewendet, da sie handwerklich relativ aufwendig ist. Gleichzeitig hat der traditionelle Blockhausbau jedoch Eigenschaften, die dessen Wiederbelebung sinnvoll erscheinen lassen. Der digitale Blockbau könnte es ermöglichen, Baumstämme zu verwenden, die in der normalen Forstwirtschaft durch Holzfehler Ausschuss wären. So könnten auch abholzige Baumstämme sehr gut verwendet werden, dies sind Stämme die sich nach oben hin stark verjüngen (bei Nadelholz der Stammholzgüteklasse A darf der Durchmesser pro Meter Stammlänge nicht mehr als 1 cm abnehmen). Die Abholzigkeit führt dazu, dass Balken oder Kanthölzer eine verringerte Biegefestigkeit aufweisen, da die Fasern vermehrt schräg angeschnitten werden.¹ Beim traditionellen Blockbau ist das nicht der Fall, hier bleibt der Stamm weitestgehend naturbelassen und es werden kaum Fasern angeschnitten. Die Verwertung von durch neue Klimaextreme vermehrt anfallendem Totholz ist außerdem ein weiterer Aspekt, der eine genauere Betrachtung der Blockbauweise interessant macht.

Die Zielstellung dieser Arbeit war daher die Entwicklung einer den traditionellen Blockhausbau modernisierenden Methode. Diese sollte die Fügung der Baumstämme mit höchster Präzision ermöglichen, dabei jedoch möglichst wenig Verschnitt erzeugen. Des Weiteren sollte trotz der organischen Form der Baumstämme ein flexibler Entwurfsprozess mit digitalen Planungswerkzeugen entwickelt werden.

Die im Folgenden beschriebene digitale Prozesskette besinnt sich zurück auf den ursprünglichen Blockhausbau und nutzt dessen Vorteile, bedient sich aber digitaler Entwurfs- und Fertigungsmethoden, um Effizienz und Präzision steigern zu können.

Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Grasshopper Skript zur automatisierten Fügung der Stämme und Erstellung eines 3-D Modells verfasst, 30 Stämme experimentell per Photogrammetrie gescannt und daraus ein physisches Modell einer Blockhaus-Eckverbindung erstellt. Dieses wurde durch subtraktive Fertigung mittels einer CNC-Fräse produziert. Das Modell soll die Präzision der ineinandergreifenden Stämme zeigen und damit die möglichen nutzbaren Vorteile digitaler Fertigungstechniken im Bereich des Blockbaus unter Beweis stellen.

Der Ansatz einer digitalen Prozesskette findet beim Blockbau bereits Anwendung (s. Kap. State of the Art), wird aber bisher nicht zur Vereinfachung traditioneller Blockbauweisen im modernen Bauwesen genutzt. Der dieser Arbeit zugrunde liegende Ansatz erkundet das architektonische Potenzial der traditionellen Blockbauweise, macht es für digitale Planung nutzbar und schließt damit eine Lücke in der Anwendung digitaler Fabrikation im Bereich des Holzbaus.

2. Digital Fabrication - State of the Art

Die digitale Fabrikation bedient sich additiver und subtraktiver Fertigungstechniken um Produkte mithilfe computergesteuerter (CNC) Maschinen herzustellen. Digitalisierung bedeutet, dass der Entstehungsprozess vom Entwurf zum fertigen Produkt größtenteils am Computer stattfindet. Basis der digitalen Fabrikation bilden Computer-Aided-Design (CAD) Programme, also Zeichenprogramme mit denen 2-D oder 3-D Linien und Volumenmodelle erstellt werden können. Dadurch lassen sich komplexe Formen und Modelle konstruieren. Diese digitalen Modelle werden durch Computer-Aided-Manufacturing (CAM) Programme in für Maschinen ausführbare Befehle umgewandelt. Diese Befehle werden dann mit den zu Form und Material passenden CNC-Fräsmaschinen oder 3-D Druckern ausgeführt.

Digitales und physisches Modell sind bis auf die Materialität identisch, daher lassen sich schon im digitalen Modell Optimierungen vornehmen. So können virtuelle Physiksimulationen wie die des Strömungswiderstands oder Materialbelastungstests (FEM Verfahren) durchgeführt werden. Der Vorteil liegt in einer höheren Effizienz und einer potenziellen Einsparung von Ressourcen. Ein weiterer Vorteil ist die Flexibilität der digitalen Fertigung. Entwurf- und Fabrikationszeichnungen gehen aus dem gleichen 3-D Modell hervor, dadurch können diese bei Änderungen ohne Mehraufwand angepasst werden. Dies wird besonders bei komplexen Projekten wichtig, hier wird inzwischen oft eine parametrische Planung angewendet, um noch effizienter vorzugehen.

Die Stärke der CNC Fertigung ist die Möglichkeit der Herstellung vieler individueller Einzelstücke. Um diesen Vorteil in der Architektur nutzen zu können, muss allerdings auch der Entwurfsprozess entsprechend angepasst werden. Am nachfolgenden Beispiel des Firmenhauptsitzes von Swatch in Biel sollen die Vorteile dieses Prozesses kurz erläutert werden.

Die wie eine sich windende Schlange anmutende Dachkonstruktion des Firmenhauptsitzes besteht aus gut 3.000 verschiedenen Verbindungsknoten (Abb. 1). Die konstruktiven Details all der unterschiedlichen Träger händisch zu konstruieren wäre ein immenser Aufwand gewesen. Die kleinste Änderung im Verlauf der Planungsphase hätte einen großen Mehraufwand bedeutet.

Um diesen Aufwand zu reduzieren wurde daher ein parametrisches Modell des Tragwerkes erstellt. Hierfür wurden Regeln für die automatische Modellierung der Holzträger definiert, diese wurden in drei Kategorien je nach Krümmung unterteilt.

Nachträgliche Änderungen waren auf diese Weise leicht auf das gesamte Tragwerk überführbar ohne gänzlich neue Zeichnungen anfertigen zu müssen. Die Komplexität des Tragwerkes wurde nicht auf 2-D Zeichnungen heruntergebrochen, sondern als 3-D Modell dargestellt. Dieses konnte nun verwendet werden, um daraus die Fräsdaten für die mehrfach gekrümmten Holzträger zu erstellen.²

Das Projekt „Infinte variations, radical strategies“ von Martin Self und Emmanuel Ver-cruysse nutzt die natürlichen Formen der Baumstämme direkt (Abb. 2). Mit dem Ziel, Astgabeln zu einem komplexen Tragwerk zu formen, wurden diese zunächst 3-D gescannt, um daraufhin mithilfe eines Optimierungsmechanismus platziert zu werden. Ein Linienmodell gab die grobe Form des Tragwerkes vor. Die Mittellinien der Astgabeln wurden nun entlang dieses Linienmodells ausgerichtet. Durch Anpassung des Entwurfes an die vorhandenen Materialien wird das Holz in diesem Projekt nicht in eine vorher festgelegte Form gebracht. Vielmehr passt sich der Entwurf den vorhandenen Materialien an. Die Rohform des Holzes wird bewahrt und damit seine strukturelle Stärke.³

Im Rahmen der IBA Thüringen wurde das „Timber Prototype House“ entworfen. Das Team um Prof. Achim Menges der Universität Stuttgart und Hans Drexler der Jade Hochschule Oldenburg nutzten bei diesem Bau ebenso die Vorteile digitaler Fertigung. Durch Erstellung der Konstruktion mittels parametrischem Skript und Fräsung mit einer industriellen CNC-Großfräse entstand ein aus aufrecht stehenden Kanthölzern (Abb. 3) bestehender Vollholzpavillon. Die Praxistauglichkeit dieser Bauweise wurde mit Tests zum Wärmedämmwert unterstrichen.

Der U-Wert des „Timber Prototype House“ beträgt $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ und liegt damit unter dem in der Energieeinsparverordnung 2014 geforderten Wert von $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ für die Außenwände von Neubauten. Es handelt sich um eine Massivholzkonstruktion, die Tragwerk, Dämmung und Hülle in einem bildet. Lediglich die Regendichtigkeit erforderte eine zusätzliche Schicht aus diffusionsoffener, wasserdichter Fassadenbahn („Stamisol FA“). Um die Fassadenbahn zu verdecken wurde wiederum eine Holzlattung angebracht. So entstand ein monolithischer Blockbau, der trotzdem aktuelle Baustandards erfüllt.⁴

Anhand von drei Beispielen wurden die Möglichkeiten des digitalen Holzbaus deutlich gemacht. Das erste Beispiel entstammte der freien Wirtschaft und bestätigt die Annahme, dass der digitale Holzbau inzwischen auch in Großprojekten zu wettbewerbsfähigen Preisen umgesetzt werden kann. Beim zweiten Beispiel handelt es sich um ein Forschungsprojekt. Dieses verdeutlicht die Stärken nicht standardisierter Bauteile, vor allem im Hinblick auf deren automatische und computergestützte Verarbeitung. Das dritte Projekt validiert die Annahme, dass ein monolithischer Holzbau gleichzeitig modernsten energetischen Standards gerecht werden kann. Eine monolithische Bauweise aus ausreichend dicken Baumstämmen könnte folglich ähnliche Dämmwerte erreichen.

Die Möglichkeiten, die sich durch die Kombination dieser unterschiedlichen Herangehensweisen an die Holzverarbeitung ergeben, wurden wiederum in dieser Studienarbeit mithilfe physischer Modelle und Experimente ausgelotet.

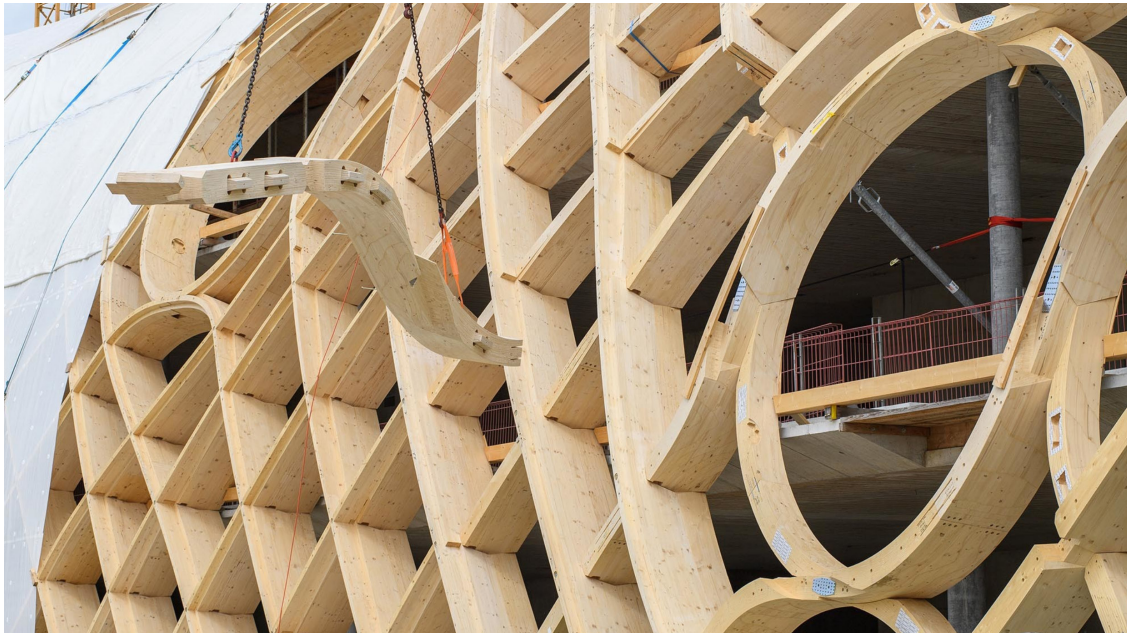


Abb. 1: Montage der Holzträger, Firmensitz von Swatch in Biel



Abb. 2: «Infinte variations, radical strategies»
Woodchip Barn, Hooke Park



Abb. 3: Die Balken des «Timber Prototype House» haben
zahlreiche Schlitz zur Erhöhung der Dämmwirkung.

3. Traditioneller Blockhausbau

3.1 Historie

Bereits in der Bronzezeit sind die ersten Blockbauten nachgewiesen. Der Schwellenrest der Wasserburg von Buchau aus dem Federseemoor (1100 – 750 v. Chr.) ist eines der ersten nachweisbaren Beispiele.⁵ Diese zeitliche Einordnung hilft zwar die historische Relevanz der Blockbauweise zu verstehen, zum tieferen Verständnis des Blockbaus sind jedoch auch der Bauablauf und die benutzten Werkzeuge von großer Bedeutung.

Im Wald werden die Baumstämme geschlagen und auf die Baustelle transportiert. Hier werden sie zur Trocknung und Weiterverarbeitung entrindet. Daraufhin beginnt die Vormontage aus dem frischen, noch feuchten Holz. Die dicksten Stämme werden für die Fundamentschicht ausgewählt, da diese die größte Last zu tragen hat. Nachdem die Stämme an den Ecken verbunden wurden, wird die nächste Lage darauf gestapelt. Mit einem speziellen Zirkel wird die Kontur des unteren Stammes an den oberen Stamm angerissen (siehe Abb. 4). Mit Stemmeisen oder Handaxt wird der so markierte Teil des oberen Stammes per langwieriger und mühseliger Handarbeit Stück für Stück entfernt (Abb. 5). Dabei wird Balkenlage für Balkenlage vorgegangen. Die Balken können erst an Ort und Stelle mit dem Zirkel angerissen und bearbeitet werden, so müssen die Handwerker am Ende in luftiger Höhe mit ihren Werkzeugen den schweren Balken bearbeiten.

Sollte der Aufbau nicht an der finalen Baustelle erfolgt sein, werden die Baumstämme nach der Trocknung demontiert und auf dem Grundstück wieder zusammengesetzt. Um Ungenauigkeiten auszugleichen und das Haus weitestgehend luftdicht zu machen, werden die Fugen zwischen zwei Stämmen mit Moos gestopft (Abb. 6).⁶ Moos ist ein natürlicher Dämmstoff, der am Boden dunkler Nadelwälder vermehrt vorkommt.



Abb. 4: Übertragung der Stammkontur mit speziellem Zirkel



Abb. 5: Bearbeitung mit Handaxt für die nächste Balkenlage



Abb. 6: Moos zwischen den Balkenlagen

Indem die Stämme nur entrindet und die Holzfasern nicht angeschnitten werden, dringt kaum Schlagregen in diese ein. Außerdem wird für die Fügung der Stämme die Unterseite der Oberseite ausgehöhlt, so wird die Entstehung von Hohlräumen verhindert, in welchen sich stehendes Wasser sammeln könnte. Nur auf feuchtem Holz siedeln sich Mikroorganismen an. Ist die Konstruktion dementsprechend geschützt, sorgt dies für eine hohe Langlebigkeit der Konstruktion.

In der Blockbauweise gibt es verschiedene Arten von Eckverbänden. Diese werden in zwei Hauptgruppen unterteilt. Die erste Gruppe hat einen Balkenüberstand, zu ihr zählen die einfache und hakenartige Verkämmung und die Verschränkung. Die zweite Gruppe hat keinen Balkenüberstand, zu ihr zählt die Verblattung und die Verzinkung.⁷ Bei der Decken- und Bodenkonstruktion galt es die Wärme im Raum zu halten. Hierfür wurden die Dielen- und Deckenbretter mit Lehm gedichtet, mit Lehm-Kies Mörtel überzogen und mit trockenem Laub, Moos oder Erdreich beschichtet.⁸

3.2 Die Werkzeuge

Als Werkzeuge benutzte man in früheren Zeiten das Beil oder die Axt, dann ging die Entwicklung über zum Schabeisen, daraus entwickelten sich Zieh-, Zug- und Schnittmesser. Zur Verzierung wurden später auch Stecheisen und Hohlbeitel benutzt. Das Ende der Entwicklung bildeten die Säge und der Hobel. Von den natürlichen Formen der Rundlinge (Holzstämme) entfernte man sich immer weiter, je mehr man den Werkstoff Holz maschinell bearbeitete.⁹ Das, was das erfahrene Auge und die Muskelkraft des Handwerkers ausmachte, wurde mehr und mehr durch maschinelle Vereinheitlichung jedes Stammes ersetzt.

3.3 Das Fundament

Die Basis der Wand bildet der sogenannte Schwellenkranz, dieser besteht aus dickeren Stämmen als der Rest der Wand. Anfangs lagen diese Stämme auf dem natürlichen Boden, wurden aber später auf Streifenfundamenten aus Stein/Trockenmauerwerk gelagert, um vor der aufsteigenden Feuchte des Bodens, Staunässe durch Schnee sowie vor den abtropfenden Spritzern bei Starkregen zu schützen.¹⁰

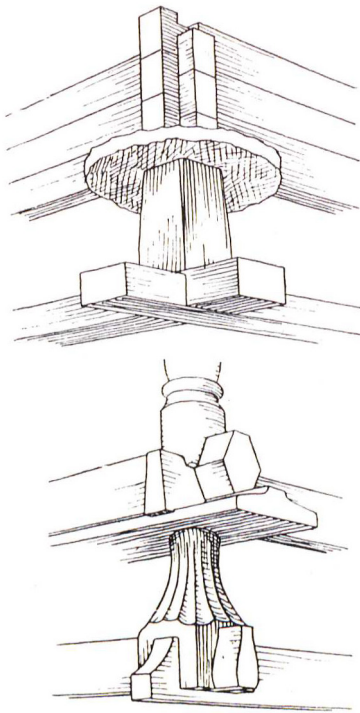


Abb. 7: Stützen unter Speichern und Stadeln

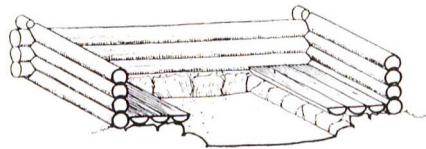


Abb. 8: Basisbildung bei einem Eldhus aus Norwegen

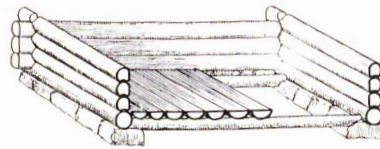


Abb. 9: Basis eines Blockbaus mit Fußboden auf Lagerhölzern

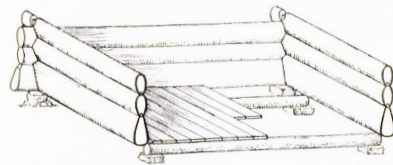


Abb. 10: Lagerung eines Blockbaus mit verstärktem Schwellenkranz auf einem Balkenrost

3.4 Die Wand

In die Auflagerflächen von Blockbalken waren Hohlkehlen eingearbeitet. Diese Hohlräume wurden in manchen Regionen vor dem Aufschichten der Balken mit Moos oder einer Mischung aus Moos und Kalkputz aufgefüllt. Durch das Aufeinanderstapeln der schweren Stämme wurden die Fugen so abgedichtet. In alpinen Gebieten Österreichs wurden auch Hanfstricke als Dichtung benutzt.¹¹

Um ein Eindringen zu verhindern und ein Abfließen von Schlagregen zu erleichtern, wird die Hohlkehle jeweils in die Unterseite eines Stammes eingearbeitet. Um die Baumstämme in vertikaler Richtung zu sichern, wurde außerdem des Öfteren mit zusätzlichen Dübeln oder mit Zangen gearbeitet (Abb. 13,15,16).¹²

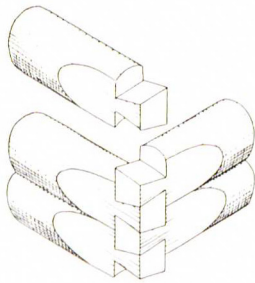


Abb. 11: Eckverbindung von Rundlingen durch Schwalbenschwanzverbindung

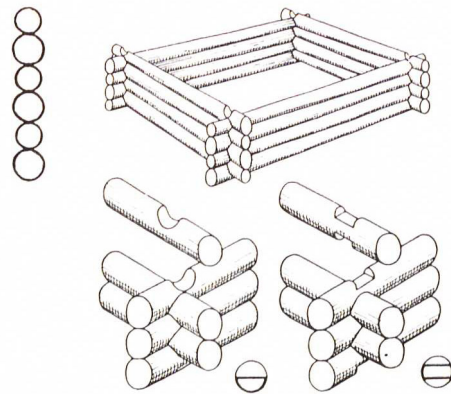


Abb. 12: Aufbau einer Blockwand aus in der runden Naturform belassenen Baumstämmen, wobei mit der Stammrichtung in jeder Lage gewechselt wird (oben). Frühe Eckverbindungen durch einseitiges Verkämmen und Verschränken (unten).

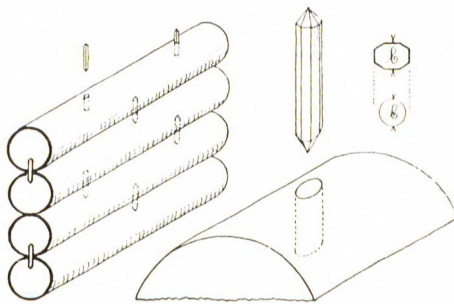


Abb. 13: Verdübelung einer Blockwand

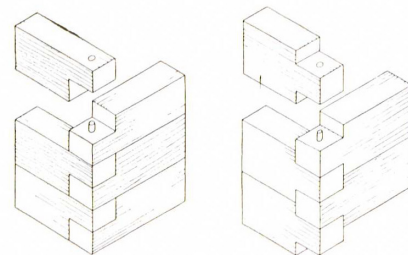


Abb. 14: Eckverbindung durch Verblattung

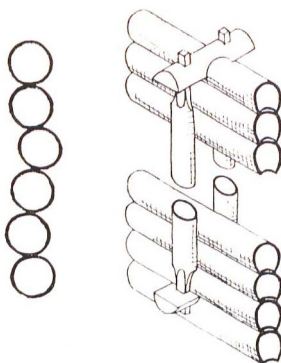


Abb. 15: Durch eine Zange gesicherte Blockwand

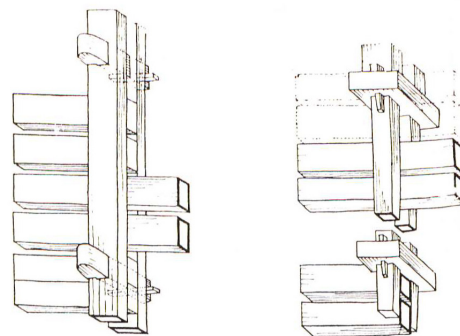


Abb. 16: Zangen an Schweizer Blockbauten

3.5 Die Zwischenwände

Die Zwischenwände können durch Verschränkung und Vorstoß oder durch Verzinkung miteinander verbunden werden. Besonders hervorzuheben ist dabei das Kling- oder Malschrot. Hier werden die Zwischenwände an der Außenfassade durch Schattenrisse unterschiedlichster Form sichtbar: unter anderem in Form von Zimmermannswerkzeugen wie Beil und Axt (Abb. 17).¹³

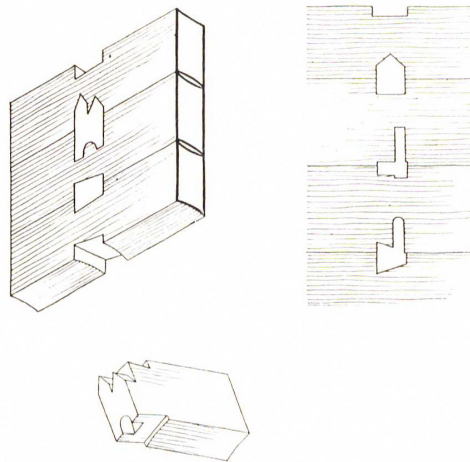


Abb. 17: Kling- oder Malschrot bei der Einbindung von Balken der Zwischenwände

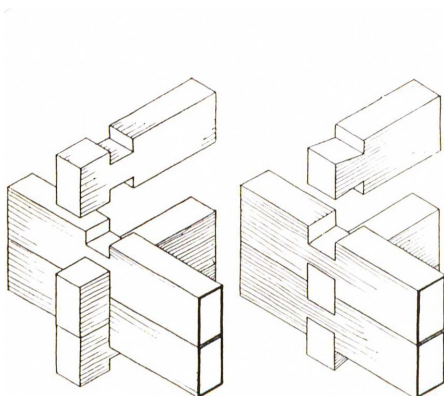


Abb. 18: Einbinden von Zwischenwänden durch Verschränkung und Vorstoß (links) und Verzinkung

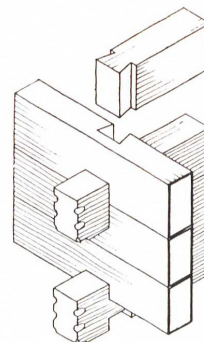


Abb. 19: Wechsel von Verschränkung und schwalbenschwanzförmiger Spundung bei der Einbindung einer Zwischenwand

3.6 Das Dach

Unter der Vielzahl an Lösungsansätzen für die Dachkonstruktion findet sich nur einer, der ausschließlich im Blockhausbau Anwendung fand. Andere Dachformen finden sich so auch in Holzrahmenkonstruktionen und anderen Bauformen.

Die gewölbte Decke, wie sie in den Bildern unten zu sehen ist, wurde zu einer Art Tonnendach errichtet und anschließend mit dem eigentlichen Dachgerüst überdeckt. In Form von Kornspeichern wurde auf die Balkenlage sogar noch einmal eine Schicht Lehmputz aufgebracht, so wollte man sich so gut wie möglich vor Ungetier schützen.¹³

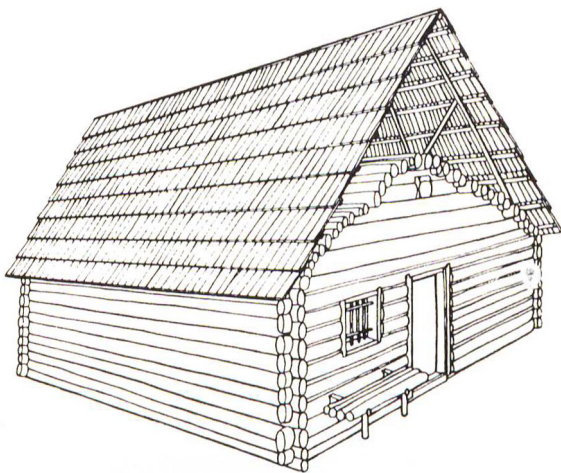


Abb. 20: Holzknechthütte mit gewölbter Zwischen-
decke unter dem eigentlichen Dachgerüst (jetzt im
Freilichtmuseum Stübing bei Graz)



Abb. 21: Kitting aus Unterschützen im Burgenland/
Österreich

3.7 Aktueller Blockhausbau

Blockhäuser sind auch heutzutage noch eine weitverbreitete Bauart für Einfamilienhäuser. Vor allem in waldreichen Gegenden wie Kanada, Russland und Skandinavien findet man Baufirmen, die Blockhäuser anbieten. Abbildung 24 zeigt typische Wandstärken der unterschiedlichen Wandaufbauten. Hier wird deutlich, dass Vierkant- und Rundprofile den Naturstamm größtenteils verdrängt haben.



Abb. 22: Blockhaus aus Vierkantprofilen

Die Stärke des modernen Blockhausbaus liegt in der Vorfertigung, so werden die Balken meist in den Werkhallen der Baufirma gefertigt und das Haus dann vor Ort in kürzester Zeit zusammengesetzt. Dadurch ist der Bauprozess unabhängig von Jahreszeiten und Wetter und es können Personalkosten gespart werden. Die Planungsphase muss allerdings komplett abgeschlossen sein, bevor mit der Fabrikation begonnen werden kann. Aufgrund der seriellen maschinellen Fertigung wird dabei stets mit einer Auswahl an festen Balkenmaßen gearbeitet.

Je nach Wandaufbau können diese Blockhäuser auch aktuellsten Anforderungen der EnEV gerecht werden.¹⁴ Gleichzeitig sind Blockhäuser aber auch eine kostengünstige Bauweise, so kann mit einem Preis von 160 bis 450 € pro m² gerechnet werden.¹⁵

Die Diffusionsoffenheit ist ein weiterer Vorteil einer einschaligen Holzkonstruktion, hierdurch entsteht ein sehr gutes Raumklima. Das führt allerdings auch zu einem stetigen Schwinden und Quellen der Holzkonstruktion.¹⁶ Das Schwindmaß von Fichte beträgt beispielsweise 7,8 % in tangentialer Richtung (Abb. 23).¹⁷ Bei der Planung müssen daher Türrahmen, Fensterrahmen und Innenwände mit einem Spielraum nach oben konzipiert werden. Das Gewicht der absackenden Wand würde die übrigen Bauteile sonst beschädigen. Ein letzter wichtiger Vorteil besteht darin, dass Holz dauerhaft CO₂ bindet und damit zum Klimaschutz beiträgt.

Ein Nachteil des modernen Blockbaus im Vergleich zum traditionellen Blockhausbau liegt in der Vereinheitlichung der Baumaterialien. Um maschinell bearbeitet werden zu können, müssen die Stämme zuerst in Balkenform gebracht werden; hierbei entsteht Verschnitt. Dieser kann zwar thermisch oder in Form von Hackschnitzeln verarbeitet werden, reduziert aber den verfügbaren Balkendurchmesser. Beim traditionellen Blockhausbau bleibt der natürliche Baumstamm erhalten. Da keine Holzfasern angeschnitten werden, ist der Baumstamm witterungsbeständiger und verfügt über eine höhere Biegefestigkeit.

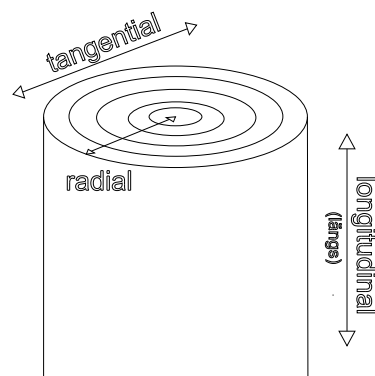
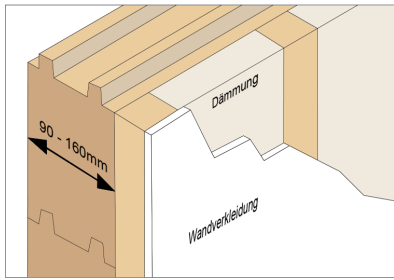
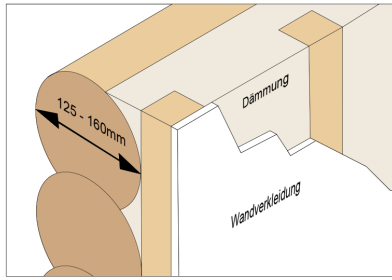


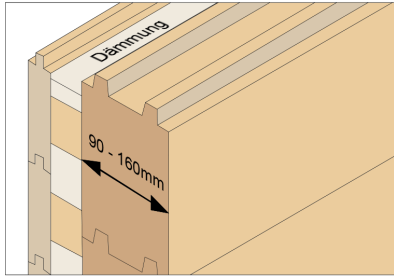
Abb. 23: Schwindverhalten Richtungen



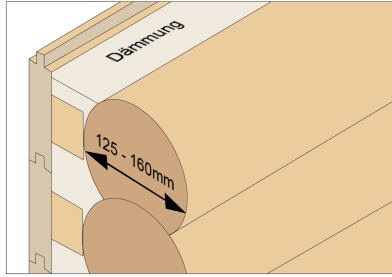
Innengedämmtes Vierkantprofil:
von 90 - 160mm



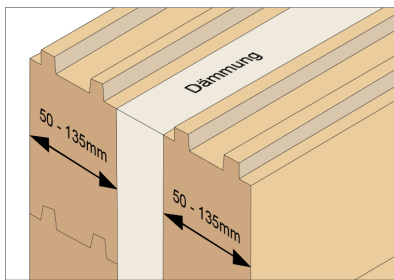
Innengedämmtes Rundprofil:
von 125 - 160mm



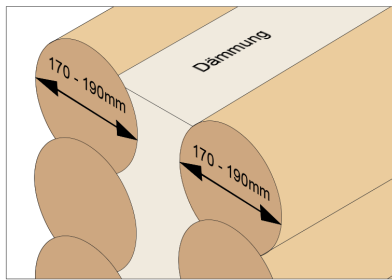
Außengedämmtes Vierkantprofil:
von 90 - 160mm



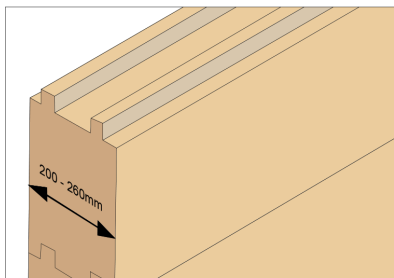
Außengedämmtes Rundprofil:
von 125 - 160mm



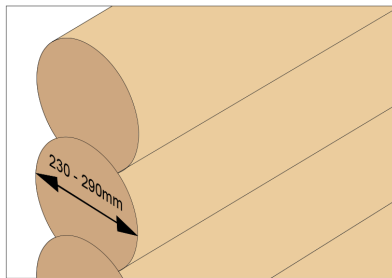
Doppelblock Vierkantprofil:
von 50 - 135mm



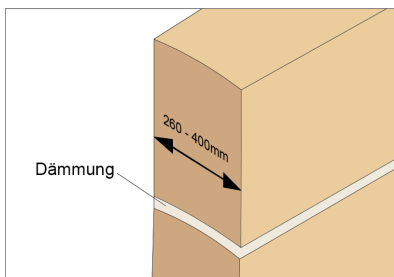
Doppelblock Rundprofil:
von 170 - 190mm



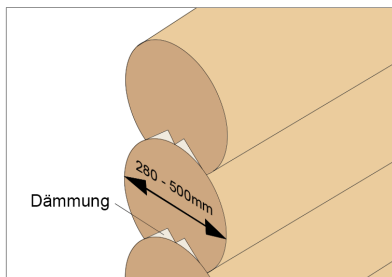
Einschaliges Vierkantprofil:
von 200 - 260mm



Einschaliges Rundprofil:
von 230 - 290mm



Naturstamm- Vierkant:
von 260 bis über 400mm



Naturstamm- Rundbalken:
von 280 bis über 500mm

Abb. 24

4. Digital Blockhouse Fabrication - ein neuer Ansatz

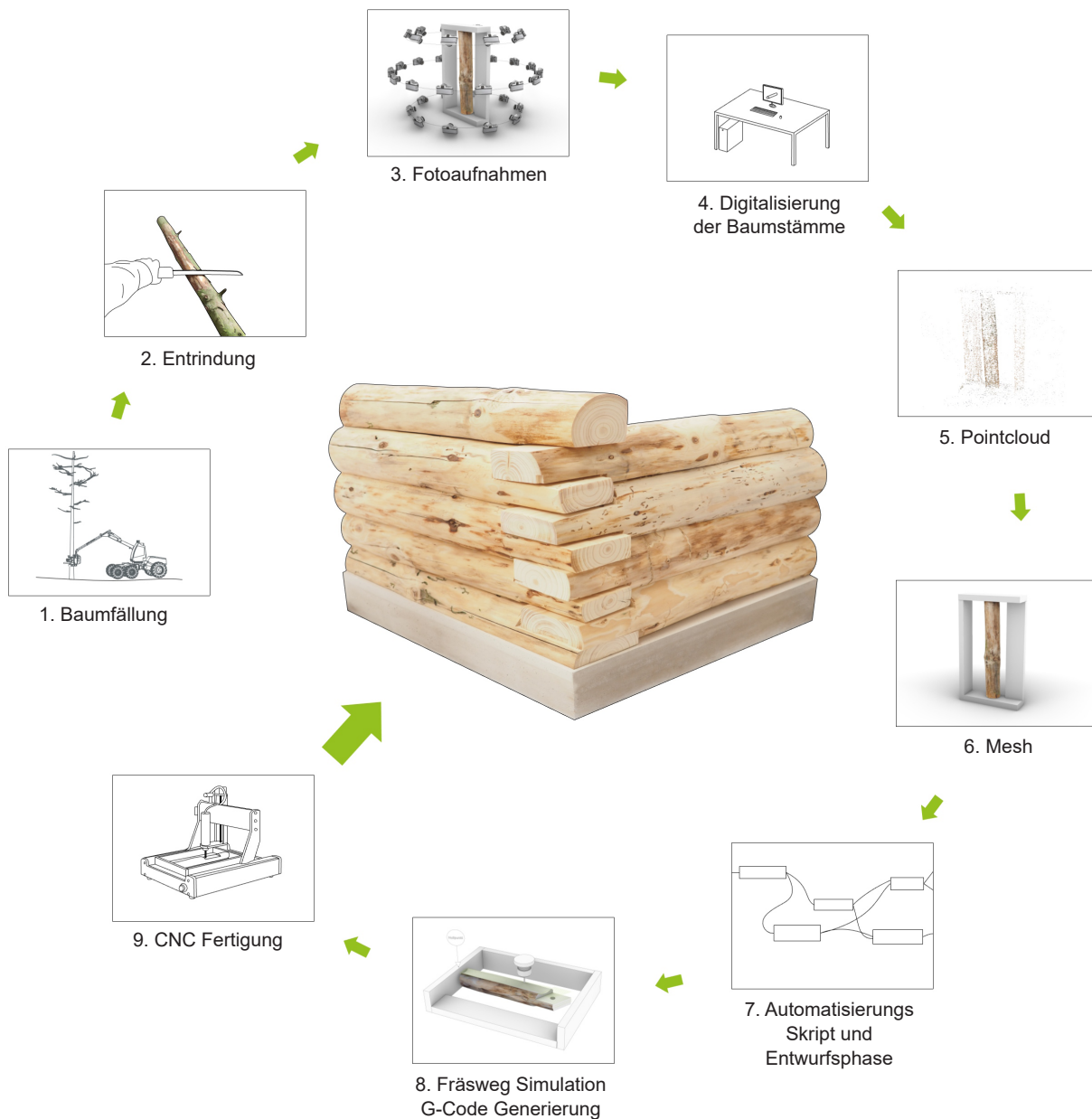


Abb. 25: Diagramm Workflow vom Baum zur fertigen Wand

Ziel der Arbeit war es, eine Prozesskette zu entwickeln, die es ermöglicht, Baumstämme in ihrer Rohform im Hausbau zu verarbeiten. Dabei sollten digitale Planungswerkzeuge zur Hilfe genommen werden, um eine effiziente und präzise Verarbeitung zu ermöglichen. Der traditionelle Blockhausbau diente dabei als Vorbild und wurde mithilfe computergestützter Fertigungsmethoden ergänzt.

Die größte Herausforderung, die einer Verarbeitung im Weg stand, waren die organischen Formen der Baumstämme. Dazu galt es zunächst einen Weg zu finden die Stämme zu digitalisieren. Nur mit präzisen 3-D Scans konnten die später geplanten Arbeitsschritte durchgeführt werden. Zunächst wurden Scantests mit Baumstämmen im Maßstab 1:1 und im Maßstab 1:5 durchgeführt. Dabei wurden zwei unterschiedliche Scantechniken getestet, das Scannen mit dem Infrarotsensor der Kinect V2 und das Scannen mithilfe von Fotos die per Photogrammetrie zu einem 3-D Scan rekonstruiert werden.

Die zweite große Hürde bestand darin, die Menge der gescannten Baumstämme auf effiziente Weise zu verarbeiten. Hierzu wurde ein Skript entwickelt, welches die 3-D Meshes der Baumstämme automatisch im digitalen Raum bewegt und wie bei der traditionellen Blockbauweise übereinander stapelt.

Im letzten Schritt wurde die digital erstellte Blockhausecke wiederum zur computergesteuerten Fertigung eines 1:5 Modells aus den gescannten Baumstämmen benutzt. Eine Einspannvorrichtung für die Stämme sorgte dabei für die präzise Übertragung vom digitalen Modell zur CNC-Fräse. Von den 30 Stämmen aus der 3-D Scan Datenbank wurden schließlich 9 Stämme zu einer Eckverbindung gefügt und per 3-Achs CNC-Fräse bearbeitet.

4.1 Das Ausgangsmaterial Fichtenholz

Nadelhölzer werden bevorzugt in der Bauindustrie verwendet, da sie die wirtschaftlich lukrativsten Eigenschaften besitzen. Die Fichte ist die in Deutschland am weitesten verbreitete Nadelholzart. Sie wird aufgrund des geraden Wuchses, des raschen Wachstums, der geringen Ansprüche an den Standort und der guten Verwertbarkeit des Holzes geschätzt.¹⁸ Der gerade Wuchs ist auch für die Verwendung im Blockhausbau ein wichtiger Faktor. Die Lärche ist für den Blockhausbau ebenfalls sehr gut geeignet, da das harzreiche Holz relativ witterungsbeständig ist.¹⁹

Neue Verwendung für Totholz

Aufgrund der momentanen Trockenheit gibt es viele geschwächte und absterbende Bäume. Diese stehen zwar noch aufrecht im Wald, sind aber meist Totholz. Durch die langsame Trocknung über mehrere Jahre, sind diese Bäume aber besonders für die direkte Weiterverarbeitung im Blockhausbau geeignet. Sie haben einen geringen Wasseranteil und durch die langsame Trocknung weniger Trockenrisse.²⁰

Diese abgestorbenen Bäume könnten zukünftig noch verstärkt auftreten. Der Klimawandel sorgt für immer extremer werdende Temperaturschwankungen, so gab es 2018 und 2019 ungewöhnlich wenig Niederschlag in ganz Deutschland. In den dadurch geschwächten Wäldern entstand ein Schadhölbefall, der auf 160 Millionen Kubikmeter Holz geschätzt wird.²¹ Dieses wertvolle Kapital kann allerdings nur in begrenzter Menge von den Sägewerken verarbeitet werden. Die Flut an verfügbarem Holz hat zu einem Verfall der Rohholzpreise geführt.

So lohnt es sich für die Forstbetriebe oft nicht einmal die absterbenden Bäume zu roden, da dies kaum kostendeckend möglich ist.²²

Zwar stellen die abgestorbenen Bäume auch ein Refugium für Buntspechte und andere Tierarten dar, bieten gleichzeitig aber auch Lebens- und Vermehrungsgrundlage für Borkenkäfer. Bei zu viel Totholz kann es zu einer sprunghaften Vermehrung von Borkenkäfern kommen, welche gesunde Bäume ebenfalls befallen und schädigen. Die Entfernung von Totholz dient daher auch dem Erhalt des Waldes.²³

Für die Entwicklung des digitalen Arbeitsprozesses musste zunächst eine Materialgrundlage geschaffen werden. Dafür wurden abgestorbene 7 bis 10-jährige Fichten aus einem nahegelegenen Wald gefällt (Abb. 26). Weil das Fichtentotholz noch aufrecht stand, war dessen Holzfeuchte sehr gering. Außerdem hatte sich die Rinde durch die Trocknung stellenweise vom Stamm gelöst. Dies vereinfachte die manuelle Entrindung der Stämme. Die Entrindung von Stämmen beschleunigt die Austrocknung, was wiederum eine Ansiedlung von holzbrütenden Käferarten und Holzpilzen verhindert.²⁴



Abb. 26: abgestorbene Fichten als Ausgangsmaterial

4.2 Arbeitsabläufe

Nachdem die rohen Baumstämme entrindet und getrocknet wurden, waren sie bereit 3-D gescannt zu werden. In diesem Kapitel wird erläutert, wie und mit welcher Technik die Baumstämme digitalisiert wurden.

4.2.1 3-D Scanning

Die Scans wurden mit kostengünstigen, leicht verfügbaren digitalen Werkzeugen erstellt. Zunächst wurden dazu drei Baumstämme von 17 cm Durchmesser und circa 160 cm Länge als Testobjekte verwendet. Diese wurden auf zwei 30 cm hohen Kisten aufgebockt, um von allen Seiten gescannt werden zu können. Die verwendete Technik bediente sich einer Xbox Kinect V2 für 60 € (Abb. 27) und des dazugehörigen Kinect for Windows SDK 2.0 Softwarepakets. Damit ließen sich die Tiefeninformationen des Kinect Sensors in Echtzeit auslesen und mit einem Computer verarbeiten. Ein Scan war damit innerhalb von 2–3 Minuten erstellt.

Sonnenstrahlen verfälschen das Scanergebnis des Kinect V2 Infrarotsensors, weswegen der Scanprozess mit abgedunkelten Fenstern durchgeführt wurde.²⁵ Beim Scanprozess wurde die Kinect langsam um den Stamm herum bewegt. Durch langsame und gleichmäßige Bewegungen entstand ein Rundumscan des Stammes. Die Synchronisierung der Livedaten war dabei problematisch, da der Scanvorgang oft bei der Hälfte des Stammes einfro. Dieser Prozess musste daher oft mehrmals wiederholt werden um zufriedenstellende Ergebnisse zu erzielen. Das gesäuberte und zusammengefügte Resultat von drei Baumstamm Scans war aber dennoch zufriedenstellend (Abb. 28).

Um die Genauigkeit zu überprüfen, wurden die digitalen Stammdurchmesser mit den realen Durchmessern verglichen. Der Durchmesser von 17 cm wurde dabei mit ± 2 mm relativ genau erfasst. Der Teil des Baumstammes, der auf dem Bock lag, wurde allerdings nur von der unbedeckten Oberseite sauber gescannt. Bei der Aufhängung der Stämme an Seilen könnte auch dieser Teil noch genauer erfasst werden. Im Maßstab 1:1 ließe sich diese Methodik also vermutlich verwenden.



Abb. 27: Kinect V2 mit Infrarotsensor



Abb. 28: Drei gesäuberte Baumstammescans aufgenommen mit Kinect V2

Da die 3-D Scans für die spätere CNC-Fertigung verwendet werden sollen, war der Bearbeitungsraum der verwendeten CNC-Fräse der limitierende Faktor. Mit der Fräse konnten maximal Baumstämme von 45 bis 70 mm Durchmesser und 290 mm Länge bearbeitet werden. Daher wurde der Maßstab 1:5 für die Prototypenfertigung gewählt.

Im Maßstab 1:5 erwies sich die Kinect V2 jedoch als zu ungenau. Für die Baumstämme von 5 bis 7 cm Durchmesser war die Auflösung der Kinect von 512×424 Pixeln ²⁶ zu gering und führte zu ungenauen Scans. So musste eine andere Technik verwendet werden. Die Wahl fiel auf die Photogrammetrie als Scantechnik. Hierbei wird lediglich eine Kamera mit guter Auflösung und ein entsprechendes Softwareprogramm benötigt. Dieses berechnet aus den aufgenommenen Bildern ein 3-D Modell.

Bei der Photogrammetrie werden Fotos von allen Seiten des zu scannenden Objektes aufgenommen. Durch die Überlappung der Bildausschnitte mehrerer Bilder kann so die räumliche Lage des Objektes in Bezug zu den Kamerapositionen berechnet werden. Dies geschieht in einem rechenintensiven Algorithmus, der die Pixelinformationen der Fotos miteinander abgleicht. Aus den Pixelinformationen wird dann wiederum eine „texture-mapped point cloud“ berechnet. Das 3-D Objekt ist jetzt in Form einer gefärbten Punktwolke abgebildet. Aus dieser Punktwolke wird zuletzt das Mesh generiert.

Die Auswahl an photogrammetrischer Software ist groß, in diesem Fall wurde 3DF Zephyr Lite verwendet. Dieses Programm ermöglicht die Verarbeitung von bis zu 500 Bildern und bietet damit einen hohen Detailgrad, bei geringen Kosten von nur 170 €.

Das Programm ist einfach und übersichtlich gestaltet und kann auch von einem Laien in kurzer Zeit erlernt werden.

Für die 3-D Rekonstruktion wurden folgende Programmeinstellungen verwendet:

Camera: Close Range und Deep Point Cloud und für Surface/Texturing: Close Range und High Details.

Zunächst wurde getestet, wie präzise die Scans mit Bildern einer Smartphone-Kamera (Xiaomi Mii 9T) sind. Die Scans hatten allerdings zum Teil noch kleinere Unebenheiten und nicht vollständig erfasste Bereiche (Abb. 29). Im nächsten Versuch wurden die Bilder daher mit einer Systemkamera aufgenommen, um eine höhere Bildqualität zu erreichen (Abb. 30).



Abb. 29: Scanexperiment Nr. 2 mit Xiaomi Mii 9T und 3DF Zephyr



Abb. 30: Scanexperiment Nr. 3 mit Systemkamera und 3DF Zephyr (Stamm mit und ohne Textur)

Bei der Systemkamera handelt es sich um eine Olympus EM 10 MK II mit einem 14 mm Objektiv (Abb. 31). Um einen gleichmäßig beleuchteten Stamm abzulichten, wurde das Setup unter freiem Himmel und ohne direkte Sonneneinstrahlung platziert (Abb. 32). In drei Orbits wurden die Stämme mit einer Anzahl von durchschnittlich 45 Bildern pro Baumstamm jeweils von allen Seiten fotografiert (Abb. 33). Die Berechnung des 3-D Meshes wurde auf einem Desktopcomputer mit Ryzen 1700X CPU, 32 GB Arbeitsspeicher und einer Geforce GTX 1080 Grafikkarte durchgeführt. Die Berechnungszeit betrug zwischen 30 und 45 Minuten pro Stamm.

Um den Baumstamm im digitalen Raum besser orientieren zu können, wurde dieser in einen Holzrahmen gespannt und mit gescannt. Dieser Holzrahmen wurde später dazu genutzt, den Nullpunkt der Fräsdatei mit dem der CNC-Fräse abzugleichen.

Es wurden insgesamt drei Holzrahmen gefertigt. Ein Holzrahmen diente dabei jeweils der Einspannung von 10 verschiedenen Baumstämmen. Um die Position beim mehrmaligen Befestigen der Stämme wiederzufinden, wurden je drei Markierungen an Ober- und Unterseite des Rahmens und am jeweiligen Baumstamm angebracht und diese nummeriert (Abb. 34). Die Baumstämme sollten immer erst am Ende der Trocknungsphase gescannt werden, da es durch die Trocknung noch zu Formveränderungen im Holz kommt.

Die Ergebnisse der Scans von 30 verschiedenen Baumstämmen waren durchweg sehr detailliert, so wurden selbst 2 mm breite Holzrisse im Scan sichtbar (Abb. 30). Da es in diesem Versuch primär auf Präzision (für die spätere Verarbeitung) und weniger auf Zeit ankam, war Photogrammetrie die eindeutig bessere Option.



Abb. 31: Olympus EM 10 MK II und 14mm Objektiv



Abb. 32: Fotosetup mit aufrecht stehendem Holzrahmen



Abb. 33: Jeweils 40-50 Bilder wurden in drei Orbits um die Baumstämme herum aufgenommen.

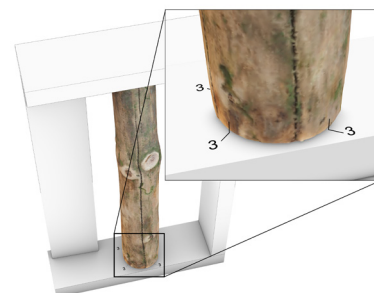


Abb. 34: Strichmarkierungen an Baumstamm und Holzrahmen zur passgenauen Befestigung

4.2.2 Aufbereitung der gescannten Meshes

Die Aufbereitung des rohen 3-D Scan war notwendig, da dieser noch maßstabslos war und inklusive der Umgebung gescannt wurde (Abb. 35).

Zur Aufbereitung wurde folgender Ablauf genutzt:

Zuerst wurde der Scan inklusive Textur nach Rhinoceros 6.0 exportiert, dort wurde er manuell gesäubert. Umgebung und Baumstamm waren zu einem einzigen Polygonnetz verbunden. Um dieses in die einzelnen miteinander verbundenen Teile aufzulösen wurde der „_Split Disjoint Mesh“ Befehl angewendet. Nun konnten die überflüssigen Umgebungsobjekte gelöscht werden, sodass das miteinander verbundene Polygonnetz von Baumstamm und Holzrahmen übrig blieb. Im nächsten Schritt musste sichergestellt werden, dass das Polygonnetz vom Baumstamm vom Polygonnetz des Holzrahmens getrennt wird. Dazu wird der Holzrahmen als Volumenkörper aus dem Polygonnetz des Holzrahmens nachgebildet (Abb. 36). Dieser Volumenkörper dient dann als Schnittfläche bei dem Befehl „_MeshBooleanDifference“.

Zuletzt wurde überprüft, ob der Baumstamm aus einem einzigen geschlossenen Polygonnetz besteht. Löcher im Polygonnetz können dazu führen, dass die für die späteren Bearbeitungsschritte wichtigen geometrischen Operationen (Boolean Operations) nicht durchgeführt werden können. Mit den Befehlen „FillMeshHoles“ und „MeshRepair“ wurde das Polygonnetz geschlossen und etwaige Fehler behoben. Zuletzt wurden Baumstamm und Holzrahmen auf die physisch gemessene Länge 3-D skaliert. Der Prozess der Aufbereitung dauerte pro Baumstamm etwa 5 Minuten.

Sobald alle 30 Baumstammsscans aufbereitet waren, wurden diese in eine gemeinsame neue Datei geladen, die sogenannte Entwurfsdatei. In dieser wurden die Baumstämme dann mit einem eigenen Skript weiterverarbeitet. Aufgrund besserer Performance wurde die Anzahl der Meshfaces nun von 150.000–1.000.000 auf einheitlich ~20.000 reduziert. Bei der Präzision der späteren Fertigung war die Größe des Fräasers von 4 mm letztendlich der limitierende Faktor, eine Auflösung des Meshes von 20.000 Dreiecksflächen war ausreichend genau. Dies wird deutlich, wenn man die Oberfläche eines Baumstamm Scans durch 20.000 dividiert und mit der Oberfläche des Fräskopfes verglich. Ein einzelnes Meshface hat eine durchschnittliche Oberfläche von 0,04 cm², ein 4 mm Fräser hat eine dreimal so große Bearbeitungsfläche von 0,12 cm². Die Datei mit 30 gescannten Meshes wurde dadurch von 523 MB auf 24,4 MB reduziert und die Rechenzeit war für die einzelnen Operationen jeweils nur wenige Sekunden lang.



Abb. 35: Rohform des Scans mit «Umgebungsrauschen»



Abb. 36: gesäubertes und skaliertes Mesh in «digitalem Holzrahmen»

4.2.3 Parametrik und digitale Planung

In diesem Schritt bestand das Ziel darin, die gescannten Baumstämme auf effiziente Weise zu verarbeiten. Hierzu wurde ein Skript entwickelt, welches die 3-D Baumstamm-scans automatisch im digitalen Raum bewegt und wie bei der traditionellen Blockbauweise übereinander stapelt und an den Ecken miteinander verbindet. Das Skript wurde entwickelt, um die einmal definierten Regeln immer wieder auf jeden neu eingefügten Baumstamm anwenden zu können.

Platzierung der Baumstämme

Zur Weiterverarbeitung werden die Baumstammsscans in die Entwurfsdatei geladen. Aufgrund der maßstabslosen Scanmethodik der Photogrammetrie befinden sich die Stämme an unterschiedlichen Positionen in der Datei.

Ziel ist es, die Stämme zu Wandelementen anzuordnen. Dies geschieht mithilfe sogenannter „Wandbasislinien“ (Abb. 42). Diese „Wandbasislinien“ kann der Architekt beim Entwerfen frei verändern, um den gewünschten Grundriss zu erstellen. Die Position der Baumstämme folgt dabei in Echtzeit der Ausrichtung der veränderten Wandbasislinie. Dieser Prozess könnte manuell und durch visuelle Überprüfung durchgeführt werden, würde damit allerdings zu einem ungenauen und fehleranfälligen Ergebnis führen. Bei später vorgenommenen Änderungen im Entwurf müssten die Stämme einzeln von Neuem angepasst werden.

Das hier entwickelte Skript automatisiert diesen Vorgang basierend auf den individuellen Baumstammradii und ermöglicht eine hohe Flexibilität im Entwurf. Um universelle Regeln auf individuelle Baumstämme anzuwenden, war der wichtigste Schritt, diese einer ordnenden Logik zu unterwerfen.

Die erste getestete Möglichkeit beinhaltet die Durchführung einer Physiksimulation, die zur Anordnung der Stämme entlang einer definierten Achse führt. Letztendlich sollte damit das im Blockhausbau angewendete Sortieren der Stämme virtuell simuliert werden. Dabei fallen die Stämme mithilfe virtueller Schwerkraft auf eine mit einer Vertiefung versehene Bodenfläche (Abb. 37). Die Stämme rutschen durch die Neigung der Bodenfläche unabhängig von ihrer Ausgangsposition stets in diese Vertiefung und kommen schließlich mit ihrem Schwerpunkt zum Liegen. So können die willkürlich im Raum platzierten Stämme entlang ihrer Längsachse ausgerichtet werden. Da für diese Methode aber eine unverhältnismäßig hohe Rechenleistung notwendig ist, kam eine andere Methode zur Anwendung.

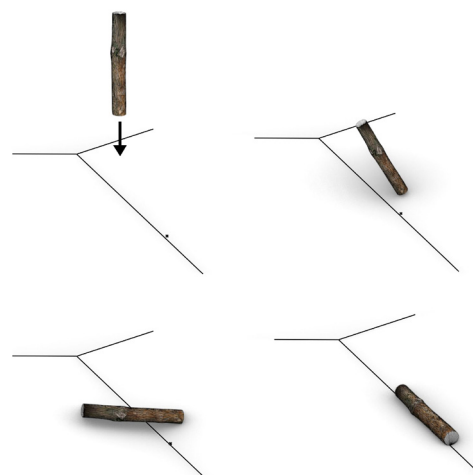


Abb. 37: Schwerkraftsimulation zur digitalen Ausrichtung der Baumstämme

Diese entstammt dem Bereich der Handhabung 3-D gescannter organischer Objekte: die „Minimum Bounding Box“. Mithilfe eines Algorithmus wird der Quader mit dem kleinsten Volumen gesucht, der das gewünschte Objekt gerade noch umschließt. Das Objekt ist hier der jeweilige Baumstamm (Abb. 38).

Der dabei generierte Quader besteht aus sechs Seitenflächen. Aufgrund der Form von Baumstämmen entsprechen die zwei Seitenflächen mit dem kleinsten Flächeninhalt den Schnittflächen des Baumstammes (Abb. 39).

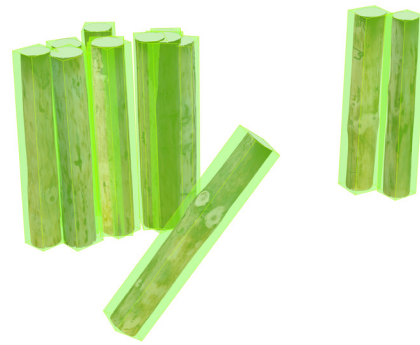


Abb. 38 Minimum Bounding Boxes (Min. BB) zur vereinfachten Bearbeitung

So lässt sich die Liste der Seitenflächen automatisch nach dem Flächeninhalt sortieren und ist bereit für weitere Arbeitsschritte. Im nächsten Schritt werden die zwei parallelen Flächen dafür genutzt, die Stämme unabhängig von ihrer Ausgangsposition gezielt im Raum zu bewegen.

Für diesen „Bewegungsbefehl“ muss ein Ausgangs- und Zielvektor definiert werden. Der Ausgangsvektor wird zwischen dem geometrischen Schwerpunkt von Stammanfang und Stammende gebildet. Der Zielvektor entspricht der jeweils gewählten Wandbasislinie. Zur automatischen Ausführung dieser Bewegungsoperation fehlen jetzt lediglich die zwei Schwerpunkte. Diese können mithilfe der Schnittflächen gefunden werden.

Da die "Min. BoundingBox" den Baumstamm perfekt umschließt, aber nicht berührt, müssen die zwei Seitenflächen aufeinander zu bewegt werden, um als Schnittflächen dienen zu können. Nachdem die zwei Schnittkreise von Stammanfang und -ende generiert wurden können daraus die zwei gesuchten Schwerpunkte extrahiert werden (Abb. 40).



Abb. 39: Auswahl der zwei Flächen des Quaders mit dem kleinsten Flächeninhalt

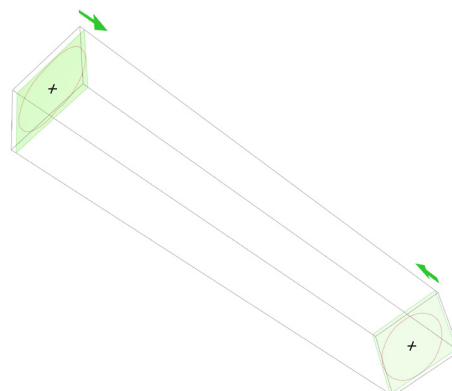


Abb. 40: Generierung der Schnittkreise (rot) zur Extrahierung der geometrischen Schwerpunkte

In diesem Schritt werden die Baumstämme auf die Wandbasislinie bewegt (Abb. 42). Im nächsten Schritt müssen die Stämme möglichst effizient übereinander gestapelt werden. Einerseits muss eine gewisse Überlappung der Baumstämme für eine ausreichende Wandstärke bestehen, andererseits sollte später nur so viel Holz wie nötig gefräst werden. Außerdem sollte am Ende eine waagerechte Wandoberkante entstehen. Durch das Wachstum von Bäumen sind diese nicht zylinderförmig, sondern stets mehr oder weniger stark konisch zulaufend. Um dies zu kompensieren, wird beim traditionellen Blockbau zwischen großem und kleinem Durchmesser alterniert (Abb. 41). Ohne die Möglichkeiten der Digitalisierung war dies die beste Methode dafür zu sorgen, dass am Ende eine möglichst waagerechte Wand entstand.

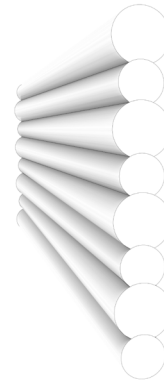


Abb. 41: Im traditionellen Blockbau werden abwechselnd große und kleine Stammdurchmesser übereinander gestapelt.

Beim digitalen Blockhaus ist dies nicht der Fall, hier sind die Stammdurchmesser an Stammanfang und -ende bekannt. Mit einem einfachen Algorithmus werden einzelne Werte von Stammanfang und -ende solange getauscht, bis die Addition aller Durchmesser auf beiden Seiten annähernd den gleichen Wert ergibt.

Zunächst müssen dafür allerdings die Stammdurchmesser ermittelt werden. Baumstämme haben keinen perfekten kreisförmigen Querschnitt, daher ist es am sichersten, den kleinstmöglichen Baumstammradius anzunehmen. Mithilfe der kürzesten Distanz zwischen dem geometrischen Schwerpunkt und dem Schnittkreis wird der Minimalwert der Baumstammradii berechnet. Durch die Wahl des Minimaldurchmessers wird sichergestellt, dass die Überlappung der Baumstämme beim Ineinanderrücken immer in nötigem Maße gegeben ist. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit erstellten Skript wird außerdem mit einer zusätzlichen Überlappung von jeweils 20 Prozent des minimalen Durchmessers kalkuliert.

Anstatt den Minimaldurchmesser als Basis für die Überlappung zu verwenden, könnte auch der durchschnittliche Baumstammradius verwendet werden. Dieser berechnet sich durch Platzierung einer großen Anzahl von Punkten auf dem Schnittkreis. Der Durchschnittswert der Distanz all dieser Punkte zum geometrischen Schwerpunkt bildet dann den durchschnittlichen Baumstammradius (Abb. 43).

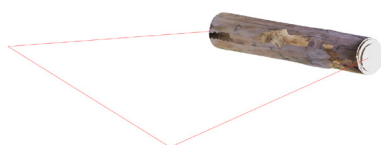


Abb. 42: Die Baumstämme werden mithilfe der Schwerpunkte auf die Wandbasislinien aus dem Entwurfsmodell bewegt.

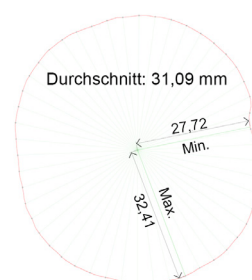


Abb. 43: Durchschnittlicher, minimaler und maximaler Baumstammdurchmesser

Nachdem die individuellen Baumstammdurchmesser bestimmt wurden, können zwei weitere Schritte durchgeführt werden. Zum einen werden die Baumstämme um die jeweils addierten Durchmesser in vertikaler Richtung nach oben bewegt (Abb. 44), zum anderen wird dafür gesorgt, dass die Wandoberkante dabei waagerecht ausgerichtet bleibt.

Die Baumstämme, deren Durchmesser in den zwei Listen getauscht wurden, müssen dabei um 180° gedreht werden, um diesen Zahlentausch auch beim jeweiligen Baumstamm physisch zu vollziehen. Dies geschieht durch die Umkehrung der Vektorrichtung des Zielvektors beim Bewegungsbefehl.

Bei einer weiteren getesteten Option werden alle Stämme so sortiert, dass sich der kleinere Durchmesser jedes Stammes an dem einen Wandende, und der größere Durchmesser am anderen Wandende befindet. Dies wäre zum Beispiel bei der Errichtung eines Pultdaches von Nutzen.

Ein weiterer Schritt, der im Laufe der Entwicklung das Skript ergänzte, ist eine Rotation des Baumstammes um die Längsachse. Nachdem die Baumstämme auf der Wandbasislinie zentriert platziert wurden, werden sie um ihre Längsachse rotiert, um eine bestmögliche Anordnung der Querschnitte zu erzeugen. Damit können verschiedene Ziele erreicht werden: eine maximale Wandstärke (Abb. 45), eine maximale Wandhöhe oder eine maximale Überlappung.

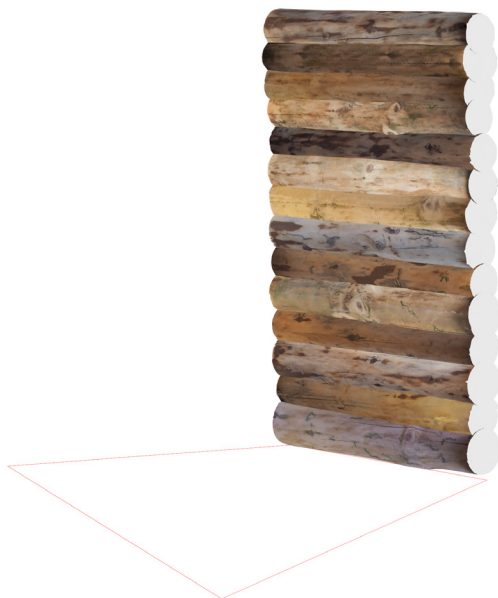


Abb. 44: Mithilfe der Durchmesser der individuellen Baumstämme werden diese vertikal nach oben bewegt.



Abb. 45: Rotation von 14 Baumstämme zur Maximierung der Wandstärke: ohne Optimierung 72,82 mm (unten) und mit Optimierung 75.13 mm (oben)

Die Stämme befinden sich nun an der gewünschten Endposition, müssen allerdings noch miteinander verschnitten werden um auch physisch gestapelt werden zu können (Abb. 46). Dies geschieht mithilfe einer „Booleschen Operation“, dem „Mesh Boolean Difference“ Befehl.

In einem weiteren Schritt werden zu lange Baumstämme auf die Länge der Wandbasislinie gekürzt. Zuletzt fehlt noch die Eckverbindung, hier wird nicht mit Booleschen Operationen gearbeitet, da sich dies als zu fehleranfällig erwies. Für eine optimale Verblattung wird jede zweite Wand um $\frac{1}{3}$ des durchschnittlichen Stammdurchmessers vertikal nach oben bewegt (Abb. 47). Der durchschnittliche Stammdurchmesser berechnet sich aus allen in den Wänden verbauten Baumstämmen. Durch diese Bewegung befinden sich die Baumstämme der einen Wand größtenteils mittig zwischen den Baumstämmen der anderen Wand.

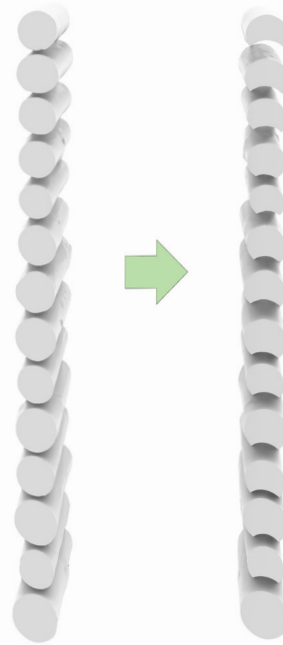


Abb. 46: «Mesh Boolean Difference»



Abb. 47: Die Eckverbindung besteht aus Flächen, die in Abhängigkeit des horizontalen Durchmessers jedes Stammes generiert werden. Hierzu wurden zunächst die Schnittpunkte mit der Stammaußenkante berechnet und dann zu Linien verbunden.

Für die Verblattung wird ein virtuelles Stück Stamm abgeschnitten und an dessen Stelle ein neuer Volumenkörper gebildet (Abb. 48). Dafür werden zunächst Flächen in Abhängigkeit des horizontalen Durchmessers aus einer Oberfläche generiert (Abb. 47). Die Position dieser Flächen wird bestimmt, indem die Mitte zwischen dem Schwerpunkt des Stammes der einen Wand und dem Schwerpunkt des nächsten Stammes der anderen Wand berechnet wird. So entstehen genau zusammenpassende Blätter, die im Zentrum jedes Baumstammes sind und deren Höhe aufeinander abgestimmt ist (Abb. 48).

Zur Fertigstellung der parametrischen Ecke fehlt noch ein letztes Detail. Ober- und Unterseite sind mit einem System aus Zapfen und Löchern versehen (Abb. 48), so sind die Stämme fest miteinander verbunden. Der Vorteil dieses parametrischen Eckdetails ist die automatische Anpassung beim Verschieben der Wandbasislinie. Dadurch besteht eine sehr viel höhere Freiheit im Entwurf Anpassungen und Veränderungen vorzunehmen. Diese sind nicht mit höherem Planungsaufwand verbunden und der Architekt spart wertvolle Zeit. Auch bleibt der Entwurf nicht auf rechte Winkel beschränkt, sondern jeder beliebige Eckwinkel kann realisiert werden. Dass diese Idee nicht nur theoretisch funktioniert, wurde schließlich mit einem physischen Eckdetail der gescannten und per Skript verarbeiteten Baumstämme belegt. Details zur Fertigung dieser Ecke werden in Kapitel 4.2.4 genauer erläutert.



Abb. 48: Im Zentrum der Eckverbindung befindet sich ein runder Zapfen, die hier generierten Oberflächen dienen als Input für die CNC-Fräse.

Anstatt die einfache Verblattung mit Zapfen zu verbinden, könnte auch eine Schwalbenschwanzverbindung verwendet werden (Abb. 49). Die Parametrisierung der angeschrägten Flächen erwies sich dabei als schwierig, weswegen in der Kürze der Zeit die einfachere Verblattung mit Zapfen umgesetzt wurde. Beide Verbindungen erfüllen jedoch die gleichen konstruktiven Vorgaben und können Druck-, Zug- und Schubkräfte aufnehmen.

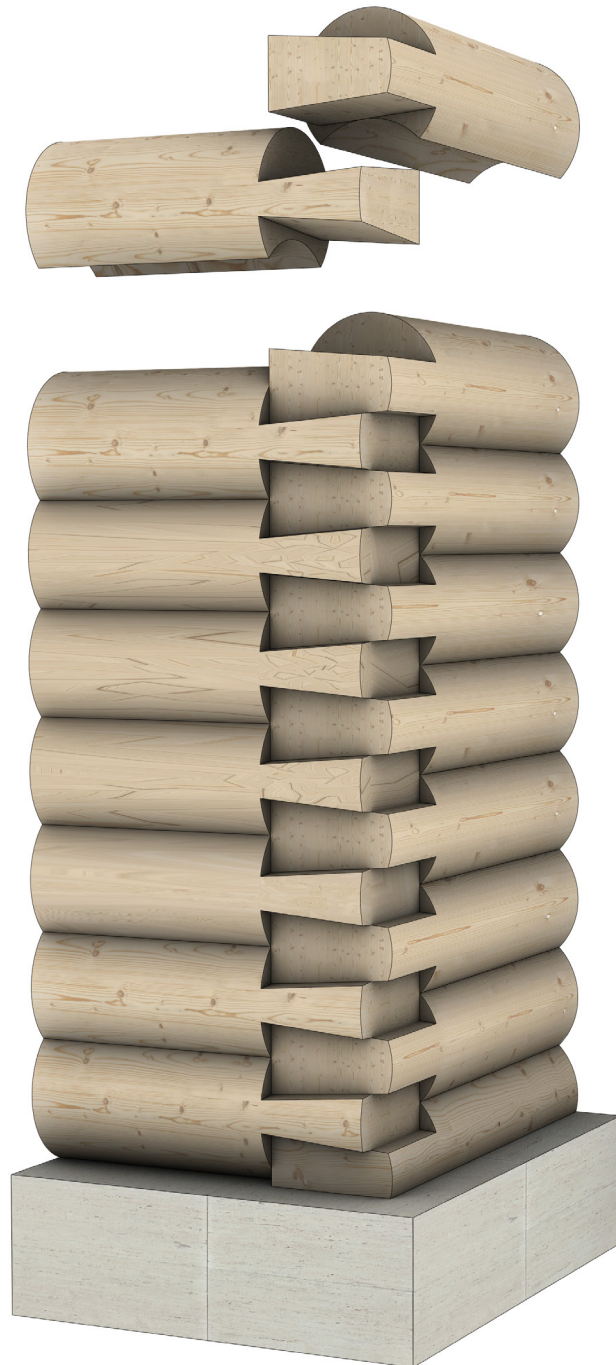


Abb. 49: Eckverbindung mit Schwalbenschwanz



Abb. 50: Eine Anpassung der Verblattung könnte für zusätzliche Luftdichtheit sorgen. Die Stämme greifen dabei wie zwei L-Stücke ineinander.

Für den finalen Prototyp wurde lediglich eine Eckvariante umgesetzt. Wie auch im traditionellen Blockhausbau gibt es aber verschiedenste Möglichkeiten der Eckverbindung (Abb. 52,53,54). Eine Eckverbindung deren Überlappung dem 1,1-fachen Stammdurchmesser entspricht ist eine der ursprünglichsten und einfachsten Varianten (Abb. 52).²⁷ Sie lässt sich durch „Boolesche Operationen“ der miteinander verschnittenen Baumstämme erzeugen. In den ersten Tests zum digitalen Blockhausbau kam diese Variante zum Einsatz. Die Scans wurden dabei noch mit Smartphone Bildern erstellt (Abb. 29). Die Genauigkeit reichte zwar für eine erste Fügung zweier Baumstämme aufeinander, diese waren in ihrer Präzision jedoch nicht mit dem finalen Prototyp vergleichbar (Abb. 51). Die Stämme wurden in diesem ersten Test auch noch nicht automatisch manipuliert, sondern mussten digital bewegt, ausgerichtet und miteinander verschnitten werden.



Abb. 51: Präzision der Fügung: erster Test (links) und finaler Prototyp (rechts)



Abb. 52: überlappende Ecke



Abb. 53: kurze überlappende Ecke



Abb. 54: Verblattung

Bevor die Fertigung genauer erläutert wird, soll zunächst noch auf zusätzliche Elemente des Skriptes eingegangen werden. Dieser Teil der Arbeit befindet sich in einem fragmentarischen Stadium, zeigt aber weitere Entwicklungsmöglichkeiten auf.

Nachdem die Eckdetails erfolgreich parametrisiert wurden, sollte dieser Prozess auch für Boden und Decke vollzogen werden. Boden und Decke wurden nach dem gleichen Prinzip wie die Wand aufgebaut. Die Ausrichtung der Baumstämme der Decke bedarf jedoch zusätzlicher Regeln, dafür werden die Wandbasislinien zunächst nach Länge geordnet. Die Ausrichtung der Längsachse der Stämme erfolgt dabei entlang der kürzesten Wandbasislinie (Abb. 56). Damit wird schon im Entwurf auf eine tragwerkstechnische Optimierung geachtet. Aufgrund der freien Gestaltung im Grundriss kann es zu stärkeren Überlappungen der Baumstämme bei der kürzeren von zwei gegenüberliegenden Wandbasislinien kommen (Abb. 56). Um in diesem Fall den anfallenden Verschnitt zu reduzieren, könnte auf stärker konisch zulaufende Baumstämme zurückgegriffen werden. Bei einer ausreichend großen Datenbank aus gescannten Baumstämmen, könnten diese entsprechend ihrer Eigenschaften sortiert und passend für das jeweilige Projekt ausgewählt werden.



Abb. 55: Boden und Decke werden nach dem gleichen Prinzip wie die Wand aufgebaut. Bedingt durch die freie Gestaltung der Wandbasislinien kann dies zu stärkeren Überlappungen der Baumstämme an den kürzeren Wandseiten führen (siehe Abb. 56).



Abb. 56: Draufsicht mit «Wandbasislinien»

4.2.4 Computergestützte Fertigung (CAM)

Die Fabrikation besteht aus zwei Phasen: Der Erstellung der Frässimulation und der anschließenden Fertigung mit dem daraus generierten G-Code (Code, der die Maschine steuert). Die Frässimulation wurde in Autodesk Fusion 360 erstellt. Dazu wurden die bearbeiteten Baumstämme mit den dazugehörigen Holzrahmen aus Rhinoceros 6.0 importiert.

Im Laufe der Fräsarbeiten wurden unterschiedliche Schlichtstrategien aus Autodesk Fusion 360 getestet. Zum einen die „Adaptive Clearing“ genannte Strategie und zum anderen die Parallelfahrt, mit auf den Eckwinkel abgestimmter Fräsrichtung (Abb. 57). Ziel war es, den Fräsvorgang ohne Werkzeugwechsel durchzuführen, also den größtmöglichen Fräser zu wählen, der dennoch alle Oberflächen sauber herstellen kann. Dies minimiert den menschlichen Anteil der Arbeit und spart damit Zeit. Zunächst wurde mit einem 8 mm Rundkopffräser gearbeitet, dieser jedoch schnell durch einen 4 mm Flachkopffräser ersetzt, da damit alle Fräsarbeiten in einem Durchgang realisiert werden konnten.

„Adaptive Clearing“ erwies sich als vorteilhaft für den Eckteil mit Nut und Feder, da es sich um eine Schlichtstrategie handelt, die die zu bearbeitende Oberfläche in kreisförmigen Bahnen bearbeitet (Abb. 58). Dadurch entstehen saubere Kanten zur Fügung von Nut und Feder. Die Parallelfahrt ist eine Strategie, die für die organische Oberfläche der Fügung von Stamm auf Stamm von Vorteil ist. Sie fährt die Oberfläche sehr genau ab und hat im Vergleich zum „Adaptive Clearing“ einen kürzeren Fräsweg (Abb. 59).

Sobald die Frässimulation abgeschlossen ist, kann daraus der G-Code für eine Vielzahl an Maschinen generiert werden, dazu muss lediglich der richtige Postprozessor aus einer Bibliothek ausgewählt werden. Durch die große Auswahl besteht eine hohe Flexibilität, was die Wahl der Bearbeitungsmaschine angeht.



Abb. 57: Vergleich von zwei Schlichtstrategien: Oben mit Parallelfahrt und unten mit «Adaptive Clearing»

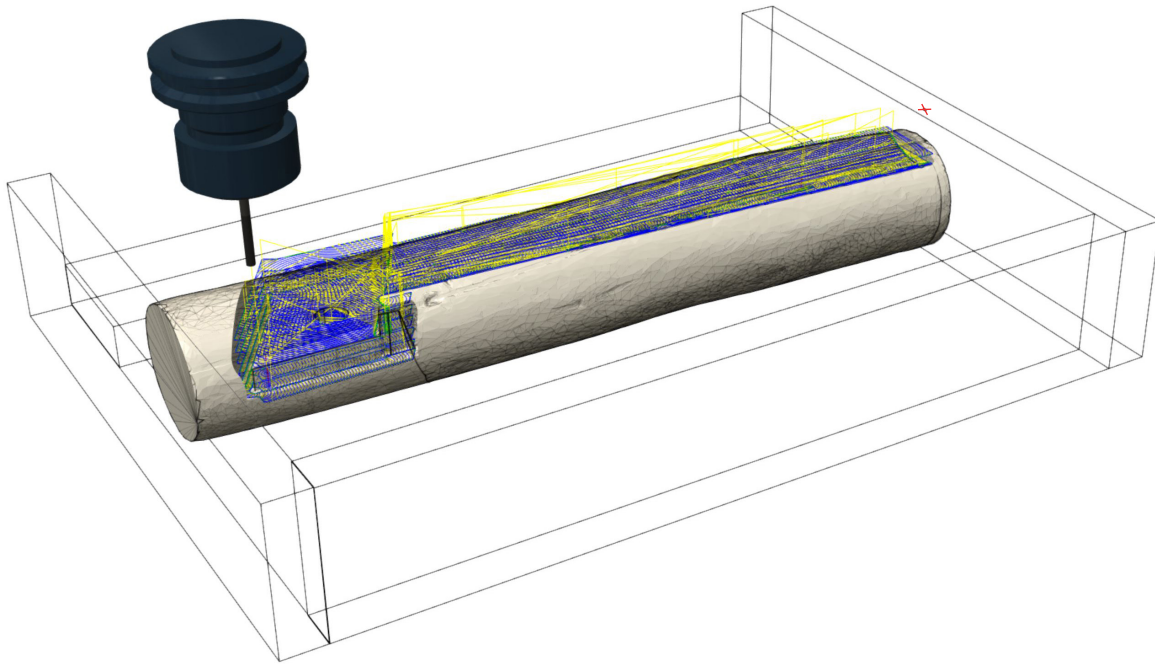


Abb. 58: Simulation des Fräsweges mit «Adaptive Clearing» die veranschlagte Bearbeitungszeit beträgt 2,5 Stunden. Das rote Kreuz stellt den digitalen Nullpunkt dar, dieser wird später als Maschinennullpunkt eingestellt.

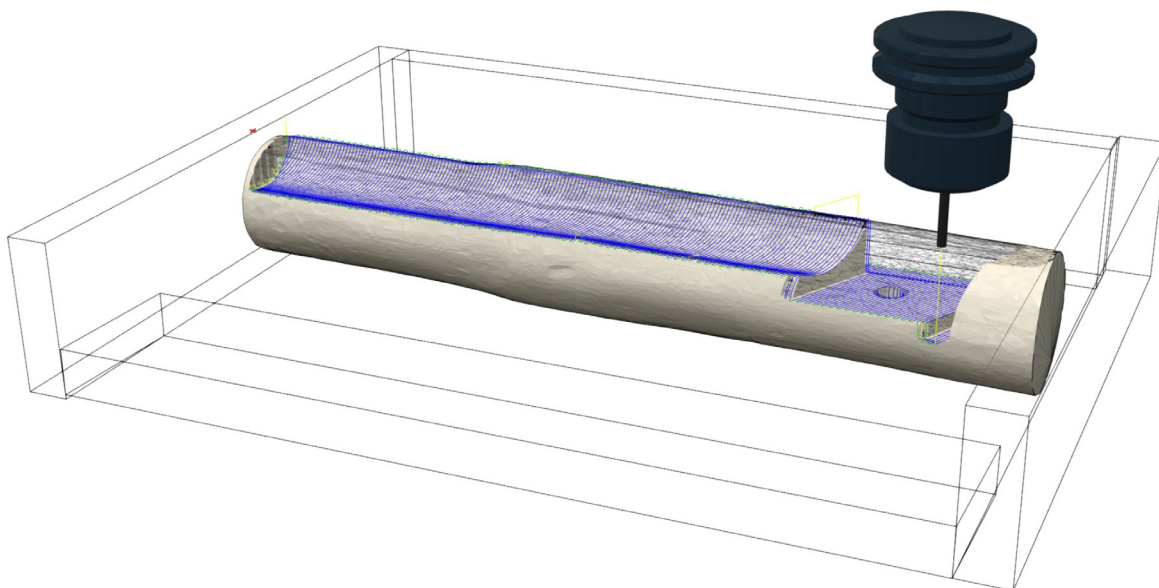


Abb. 59: Simulation des Fräsweges mit Parallelfahrt als Schichtstrategie

Die Fertigung erfolgte mit einer Stepcraft D420. Es handelt sich um eine 3-Achs CNC-Fräse für den Hobbybereich (Abb. 61). Der Bearbeitungsraum beträgt (X, Y, Z): 300 x 420 x 140 mm, die 140 mm werden allerdings durch die Höhe des Fräskopfes auf etwa 70–80 mm beschränkt. Dies ist der Grund, warum ein Prototyp nur im Maßstab 1:5 möglich war. Die Fräsgeschwindigkeit betrug 300 mm/min mit einem Fräser von 4 mm Durchmesser. Die maximale Tiefenzustellung betrug 6 mm die Seitenzustellung 1,6 mm. Dadurch dauerte die Bearbeitung einer Baumstammseite um die 2,5 Stunden. Das ist relativ langsam, liegt aber an den beschränkten technischen Möglichkeiten solch einer Hobbymaschine.



Abb. 60: Schrappstrategie «Adaptive Clearing»

Besonders hilfreich bei der Fertigung war die Einspannung in einen Holzrahmen (Abb. 61). Jeder Baumstamm wurde mit zwei Schrauben pro Seite am Holzrahmen befestigt. Die Holzrahmen wurden mit den Stämmen zusammen gescannt. So gelang die genaue Ausrichtung des Baumstammes vom digitalen zum physischen Modell ohne Mehraufwand. Der digitale Nullpunkt wurde auf dem Holzrahmen platziert und konnte als Maschinen-nullpunkt sehr einfach angesteuert werden (Abb. 58).



Abb. 61: Der Holzrahmen mit Baumstamm wird auf die Arbeitsfläche gelegt und mit Schraubzwingen befestigt.

Sobald der Fräsvorgang abgeschlossen war, musste nur noch wenig nachbearbeitet werden. Die gefrästen Flächen waren glatt genug für die Fügung der Stämme, lediglich die Haltestege mussten noch entfernt werden (Abb. 62).

Alternative Frässtrategie

Die hier vorgestellte Frässtrategie lässt einen V-förmigen Hohlraum entstehen. Sie ähnelt damit der aus dem traditionellen Blockhausbau verwendeten Technik. Der Fräser oder alternativ ein Sägeblatt folgt der Schnittlinie zwischen dem oberen und dem darunterliegenden Baumstamm. Von Vorteil ist, dass lediglich zwei tiefe Schnitte notwendig wären und die Bearbeitungszeit dadurch reduziert wäre. Nachteilig ist das Entstehen einer Wärmebrücke, die eine zusätzliche Dämmung notwendig macht. Diese Methode ließ sich allerdings nicht testen, weil hierfür eine Maschine mit einer zusätzlichen Rotationsachse notwendig wäre, da der Fräser das Werkstück in einem schrägen Winkel bearbeiten muss.



Abb. 62: Haltesteg zur Befestigung des Stammes

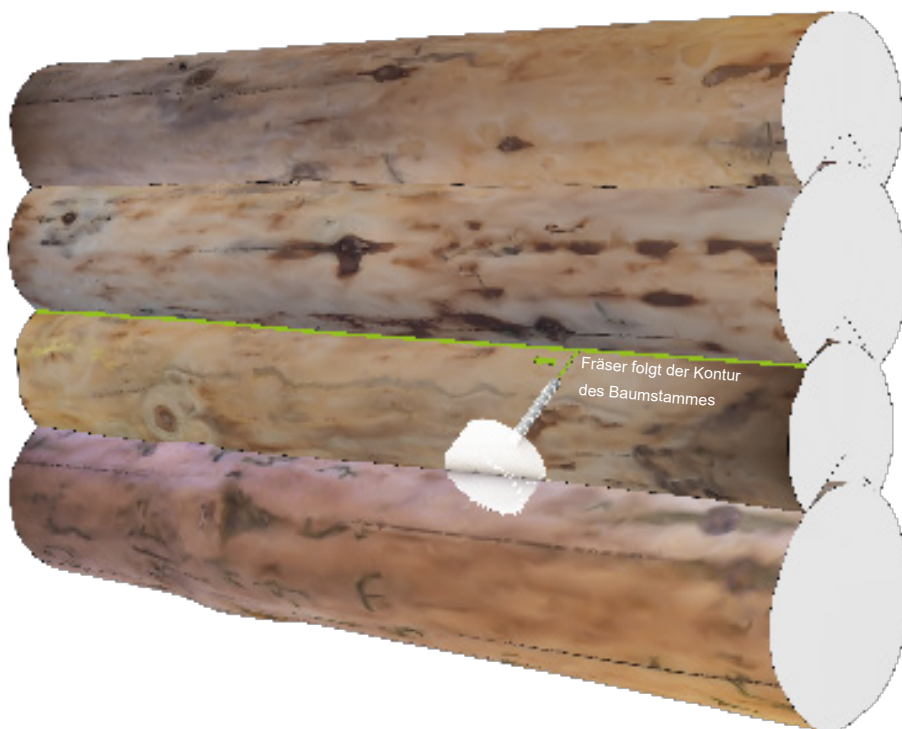


Abb. 63: Alternative Frässtrategie

4.3 Herausforderungen

Im Laufe der Entwicklung der digitalen Prozesskette galt es zahlreiche Herausforderungen zu meistern. Einige Aspekte konnten im Rahmen dieser Arbeit aus unterschiedlichen Gründen nicht vollständig bearbeitet werden und sollen im Folgenden erläutert werden.

Der Prozess von der Aufnahme der Bilder bis zum gesäuberten Mesh ist zeitaufwendig und nicht automatisiert. Hier könnten Algorithmen zur automatischen Maskierung der aufgenommenen Bilder helfen. Diese entfernen die mitgescannte Umgebung aus den Bildern, bevor sie zur photogrammetrischen Rekonstruktion des 3-D Modells genutzt werden.

Probleme im Grasshopper Skript betreffen vor allem die mangelnde Verlässlichkeit, mit der die Booleschen Operationen wie „Mesh/Mesh Difference“ durchgeführt wurden. In der Kürze der Zeit konnte hier keine zufriedenstellende Verlässlichkeit hergestellt werden. Aus 14 miteinander verschnittenen Baumstämmen mussten drei manuell in Rhinoceros 6.0 verschnitten werden. Da dies aber der letzte Teil des Skriptes war, hatte es keine Auswirkungen auf die vorangegangenen Schritte.

Aufgrund der maschinellen Limitierungen einer 3-Achs Fräse war es notwendig, das Werkstück in zwei Durchgängen zu fräsen und es dafür einmal zu wenden. Bei diesem manuellen Wenden des Werkstückes entstand eine gewisse Ungenauigkeit, da der Maschinennullpunkt jedes Mal neu gesetzt werden musste. Die Fugen, die an der Ecküberblattung sichtbar werden, sind die Folge dessen. Dies wäre nicht der Fall, wenn der Baumstamm in einem einzigen Durchgang gefräst worden wäre.

Die 3-Achs Fräse kann nur in gerader Linie nach unten fräsen. Der Baumstamm muss also möglichst so eingespannt werden, dass Materialschwächen wie Trockenrisse Teil des später weggefrästen Volumens oder der Innenwand sind. Dies im Voraus richtig einzuschätzen war schwer, da der Baumstamm später im Skript außerdem nach Gesichtspunkten wie einer Maximierung der Wandstärke ausgerichtet wurde.

Würde man eine Maschine mit mehr Bewegungsgraden benutzen, könnte man diese Probleme allerdings beheben, eine zusätzliche Rotationsachse für die 3-Achs Fräse wäre eine mögliche Lösung.

5. Zusammenfassung

Die abschließende Evaluation lässt sich in mehrere Bereiche unterteilen. Zunächst wird die Frage beantwortet, wie sich der Rohstoff Holz in seiner natürlichen Form in einem digitalen Entwurfs- und Fertigungsprozess auf Basis des traditionellen Blockhausbaus verarbeiten lässt. An diese Frage schließen sich weitere Teilbereiche an, diese betreffen die Effizienz, Flexibilität und Umweltfreundlichkeit der vorgeschlagenen Prozesskette.

Die erste Aufgabe bestand darin, die Baumstämme trotz ihrer organischen Formen genau zu erfassen. Es galt einen Weg zu finden, die Stämme zu digitalisieren. Zunächst wurden 3-D Scantests mit Baumstämmen im Maßstab 1:1 und im Maßstab 1:5 durchgeführt. Dabei wurde per Photogrammetrie und mit Kinect V2 gescannt, wobei sich die Photogrammetrie wegen ihres höheren Detailgrades durchsetzen konnte: es wurden selbst 2 mm breite Strukturen im Holz sichtbar. Die Bearbeitungszeit von den Fotoaufnahmen zum skalierten und gesäuberten 3-D Scan betrug zwischen 45–55 Minuten pro Stamm. Für den Scanprozess wurde ein eigenes Setup implementiert, welches die spätere computergesteuerte Fertigung erleichterte. Dieses Setup bestand aus einem Holzrahmen, in dem die Baumstämme verschraubt und aufrecht stehend fotografiert wurden. Der Holzrahmen und die Baumstämme wurden mit Markierungen versehen, um auch ein mehrfaches Befestigen der Baumstämme zu ermöglichen. So konnte ein Holzrahmen für das Scannen und die spätere Bearbeitung von 10 Stämmen verwendet werden. Der Holzrahmen diente dazu, den Maschinennullpunkt zuverlässig an den in der Frässimulation festgelegten Nullpunkt anzugleichen. Außerdem konnte der Baumstamm hiermit trotz seiner organisch unregelmäßigen Form zuverlässig mit der gleichen Ausrichtung wie im digitalen Modell auf dem Maschinentisch bearbeitet werden.

Die zweite große Aufgabe bestand darin, die gescannten Baumstämme auf effiziente Weise digital zu verarbeiten. Hierzu wurde ein parametrisches Skript entwickelt, welches die 3-D Polygonnetze der Baumstämme automatisch im digitalen Raum bewegt und wie bei der traditionellen Blockbauweise übereinander stapelt. Auch die Erstellung einer parametrischen Eckverbindung, die sich den verfügbaren Stämmen und definierten Eckwinkeln anpasst konnte größtenteils implementiert werden. Die automatische Analyse und Verarbeitung dauert trotz der individuellen organischen Formen der Baumstämme nicht länger als eine Minute. Der planerische Aufwand ist damit vergleichbar mit dem standardisierter Bauteile, bei Veränderungen des Grundrisses werden die 3-D-Blockhauswände innerhalb von 20-30 Sekunden ebenfalls aktualisiert. Die in der Planungs- und Entwurfsphase digital bearbeiteten Baumstämme können im nächsten Schritt direkt für die Erstellung der Fräswege genutzt werden. Die Simulation der Fräswege erfolgte mit dem etablierten CAM Programm Autodesk Fusion 360. Dies erlaubt eine maximale Flexibilität bei der späteren Wahl der Bearbeitungsmaschine.

Im letzten Schritt wurde die digital erstellte Blockhausecke wiederum zur computergesteuerten Fertigung eines 1:5 Modells aus den gescannten Baumstämmen benutzt. Es wurden 9 Stämme mit einer 3-Achs CNC-Fräse bearbeitet. Dabei wurde eine nahezu fugenlose (Fugen < 1 mm) Stapelung der Stämme erreicht (Abb. 64).

Die Zielsetzung der Entwicklung einer neuen Herangehensweise zur Modernisierung des traditionellen Blockhausbaus wurde erreicht. Die Bearbeitung, die zuvor ein Handwerker ausführen musste, wurde von einer computergesteuerten Maschine übernommen. Fügungen der Stämme geschahen zuvor Lage für Lage, eine Parallelisierung, bei der mehrere Lagen gleichzeitig angezeichnet und bearbeitet werden konnten, war nicht möglich. Durch die digitale Planung können alle Baumstämme gleichzeitig aufeinander abgestimmt und gefügt werden. Dadurch ist ein hoher Grad an Parallelisierung möglich, wodurch alle Baumstämme gleichzeitig auf mehreren Maschinen bearbeitet werden können. Auch eine Kombination aus subtraktiver Fertigung und anschließender direkter Fügung wird mit geeigneten Industrierobotern denkbar. Diese könnten nicht nur das Fräsen übernehmen, sondern im nächsten Schritt die Informationen aus dem 3-D Gebäudemodell nutzen, um die Stämme aufeinander zu stapeln.

Der traditionelle Blockhausbau lässt wenig Spielraum für spätere Änderungen, ein physisch bearbeiteter Stamm kann nicht nachträglich verschoben werden. Die „Digital Blockhouse Fabrication“ lässt all dies zu. Bevor mit der Fertigung begonnen wird, können die digitalisierten Baumstämme nach Belieben angepasst, verschoben und bearbeitet werden. Der Entwurf entwickelt sich durch das Automatisierungsskript von einem linearen zu einem iterativen Prozess. Einmal getroffene Designentscheidungen können ohne Mehraufwand revidiert und angepasst werden. Außerdem können aus dem gleichen Datensatz an Baumstämmen mehrere Gebäudevarianten gleichzeitig erstellt und digital evaluiert werden.

Die Digitalisierung der Baumstämme ermöglicht die Durchführung von Simulationen. So könnten zum Beispiel FEM Analysen zur Tragwerksoptimierung für Decken und Dächer durchgeführt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass Holz ein inhomogener Werkstoff ist und deshalb nur grobe Einschätzungen möglich sind.

Die „Digital Blockhouse Fabrication“ ist ein Ansatz, der ressourcenschonender und umweltfreundlicher zugleich ist. Die Verwertung von Totholz und stark konisch zulaufenden Stämmen kann dabei Ressourcen erschließen, die zuvor ungenutzt waren. Diese können dank der automatischen Analyse nach Durchmessern angeordnet und zu einer hochwertigen Wand gefügt werden. Die dauerhafte Bindung von CO₂ in Holzbauwerken trägt zu einem klimaneutralen Bauen bei, wenn der Rohstoff Holz dabei aber außerdem vom Wald direkt zur finalen Verarbeitung gelangt, sind weniger Bearbeitungsschritte notwendig, was die Nachhaltigkeit noch zusätzlich steigern kann.



Abb. 64: Schnittkante im 1:5 Modell

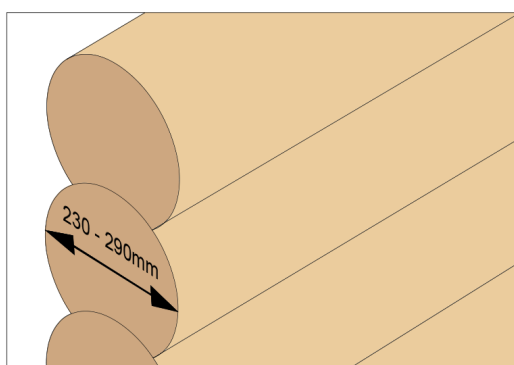
6. Ausblick und Möglichkeiten der Weiterentwicklung

Weiterentwicklung der digitalen Prozesskette

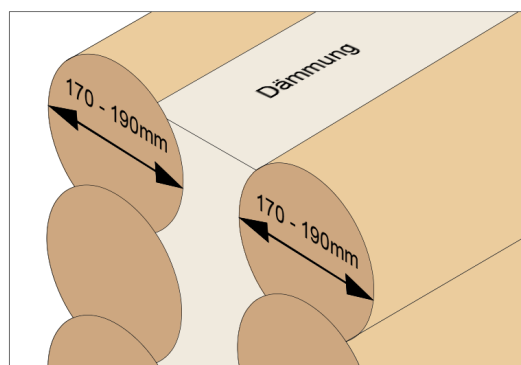
Für die Photogrammetrie wird lediglich eine gute Kamera benötigt, es müssen keine Laborbedingungen herrschen, um gute Scanergebnisse zu erhalten. Das natürliche Licht eines wolkenverhangenen Tages sorgt für weiche Schatten und damit für gute Scans. Die Methodik könnte somit auch in der staubigen Umgebung einer Baustelle oder vor Ort im Wald, bei dem stehenden Totholz angewendet werden. Es gibt aber auch Lösungen, die mithilfe von Lasertechnik ein sehr viel schnelleres Ergebnis liefern. Diese werden auch bereits in Sägewerken für eine Schnittoptimierung genutzt.²⁸

Die automatische Verarbeitung per Skript könnte in weiteren Schritten auf unterschiedliche Gebäudeteile wie Decken, Boden, Dach und Zwischenwände erweitert werden. Auch könnten Fräsungen für Türen und Fenster parametrisiert und in das Skript eingefügt werden.

Die Verwertung von dünneren Holzstämmen könnte ebenfalls in das Skript integriert werden. So könnte anhand des durchschnittlichen Durchmessers der verfügbaren Baumstämme automatisch entschieden werden, ob die Wand aus ein oder zwei Reihen von Baumstämmen (ein- oder zweischalige Konstruktion) generiert werden soll (Abb. 65). Bei Wandstücken, die länger als alle verfügbaren Baumstämme sind, müssten außerdem zwei kürzere Stämme platziert und miteinander verbunden werden.



Einschaliges Rundprofil:
von 230 - 290mm



Doppelblock Rundprofil:
von 170 - 190mm

Abb. 65: Stammdurchmesser von ein- und zweischaliger Wandkonstruktion

Untersuchung von Holzfehlern

Ein weiterer Punkt, der genauer untersucht werden könnte, ist die Möglichkeit, Trockenrisse durch das 3-D Scannen zu lokalisieren, da selbst kleine Risse durch Photogrammetrie sichtbar gemacht werden können. Um die vorhandenen Stämme optimal zu nutzen und möglichst wenig Wärmebrücken zu erzeugen, könnte man die Informationen aus dem Mesh dafür nutzen, die Stämme so zu drehen, dass die vorhandenen Risse nicht nach außen zeigen. Besonders große Abweichungen der Normalenvektoren von benachbarten Meshfaces könnten z. B. ein Indiz für solch einen Riss sein. Die Rotation des Baumstammes könnte nun automatisch entsprechend dieser Auswertung geschehen.

Da die Meshes aus „texture-mapped point clouds“ generiert wurden, könnten die Farbinformationen der Punktwolke ebenfalls für die Erkennung von Rissen genutzt werden. Eine Häufung von schwarzen Punkten wäre dabei ein Indiz für einen Trocknungsriß (Abb. 66).



Abb. 66: Texturiertes Mesh und 3-D Oberfläche im Vergleich

Skalierung

Die Erkenntnisse aus den Versuchen im Maßstab 1:5 bestätigen die Annahme, dass der gleiche Arbeitsablauf auch im Maßstab 1:1 möglich sein sollte. Die Größe der Fräswerkzeuge sowie die Größe der CNC-Maschinen lassen sich skalieren. So wären Industrieroboter ein logischer nächster Schritt. Diese könnten durch ihre 6DoF Beweglichkeit den Baumstamm in einem einzigen Fräsvorgang von allen Seiten bearbeiten. Auch könnte eine Kombination aus mehreren Robotern einen integrierten Arbeitsprozess aus Fräsen, Bohren und Assemblieren vornehmen.

Die Stämme könnten, sobald sie gefräst wurden, automatisch an die richtige Stelle der Blockhauswand platziert werden. Für die automatische Platzierung ist das Gewicht des Baumstammes ein nicht zu vernachlässigender Faktor. Ein Fichtenstamm von 40 cm Durchmesser (30 cm am dünneren Ende) und 10 m Länge hätte ein Gewicht von 455 kg. Dieses Gewicht könnte von modernen Industrierobotern wie einem Kuka Kr 500 Fortec allerdings noch bewegt werden. Ein computergesteuertes Kransystem wäre ebenfalls eine Möglichkeit, die Stämme direkt auf der Baustelle zu fertigen und gleichzeitig zu assemblieren.

Die typische Normalstammlänge in der Forstwirtschaft beträgt 5,1 m, wobei auch Längen von 11,4 m möglich sind. Größere Längen sind aufgrund der Maße von Containern und LKW schwerer umsetzbar.

Konstruktion

Um die Wand- und Dachkonstruktion wetterbeständig zu machen, könnte eine diffusions-offene und wasserundurchlässige Fassadenbahn aufgebracht und diese nachträglich mit einer Holzlattung verkleidet werden. Die unregelmäßige Form der Baumstämme überträgt sich dabei auch auf die Außenfassade aus dünnen Holzlatten. So wäre eine schlichte Wandkonstruktion möglich, bei der sich aber die organischen Unregelmäßigkeiten der Baumstämme abzeichnen und die Konstruktion sichtbar machen (Abb. 67).

Ein begrüntes Pultdach wäre eine Möglichkeit, die Tragfähigkeit eines massiven Daches aus Holzstämmen auszunutzen und umweltfreundlich zu gestalten.

Die gesamte Wandkonstruktion besteht aus dem Werkstoff Holz. Durch die Möglichkeiten digitaler Fertigung sind keine Schrauben oder Metallwinkel nötig. Die Fügung wird durch in das Holz eingearbeitete Steckverbindungen erreicht. Durch die Genauigkeit des digitalen Modells wären auch Einfräsungen für die Anbringung einer Konterlattung zur Herstellung einer glatten und geraden Innenwand problemlos möglich (Abb. 67).



Abb. 67: Streifenfundament, mit Holzplatten verschaltete Wand und Fußboden (innen), offene Holzlattung (außen)

Beim Vergleich der zwei Wände in Abbildung 68, wird deutlich, dass ein gerader Schnitt zu der gleichen äußeren Erscheinung führen würde, allerdings deutlich leichter durchzuführen wäre. Bei dieser Fügung müssten die Stämme miteinander verdübelt oder verklebt werden, um ein seitliches Wegrutschen zu verhindern. Die im physischen Modell erprobte Fügung hat hier einen Vorteil, da die Baumstämme ineinander greifen und sich dadurch gegenseitig absichern. Die Fügung der Stämme mit geradem Schnitt könnte mit einer robotisch betriebenen Kreissäge für eine signifikante Zeitersparnis bei der Bearbeitung sorgen. In weiteren Untersuchungen könnte auch diese Möglichkeit getestet werden.

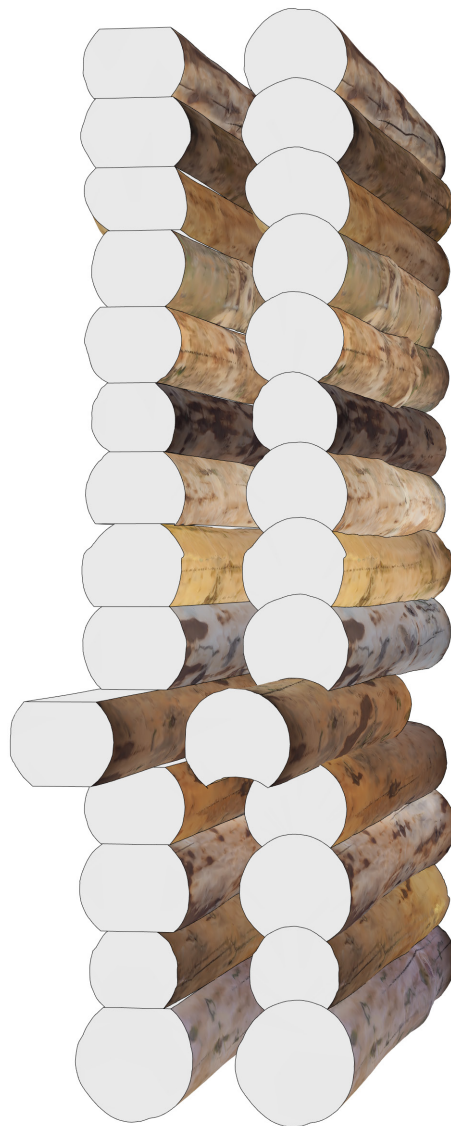


Abb. 68: Vergleich von geradem Schnitt und Fräsung

Im Gegensatz zum traditionellen Blockhausbau wäre beim digitalen Blockhausbau auch eine vertikale Ausrichtung der Baumstämme denkbar. Dies ist aufgrund der anisotropen Eigenschaften von Holz die tragwerkstechnisch leistungsfähigste Variante.

Der entscheidende Nachteil hierbei ist jedoch das Schwindverhalten von Holz. Dieses schrumpft in tangentialer Richtung am stärksten, was zwangsweise zu Schlitzen zwischen den einzelnen aufrecht stehenden Stämmen führen würde. Bei der horizontalen Stapelung ist dies nicht der Fall. Hier schließen sich die durch Trocknung entstehenden Lücken durch das Gewicht der Stämme aufeinander. Ein traditionelles Blockhaus schrumpft daher lediglich in seiner Höhe. Die "Digital Blockhouse Fabrication" mit aufrecht stehenden Stämmen zu planen ist daher eher kritisch zu sehen.

Durch die Trocknung von Holz findet eine Schrumpfung über Zeit statt. Türrahmen, Fensterrahmen und Innenwände müssen mit einem Spielraum von bis zu 7,5 Prozent nach oben konzipiert sein, da das Holz in den ersten 10 Jahren durch Trocknung schrumpft und die Wände dadurch absacken. Diese Hohlräume werden typischerweise mit Dämmung gefüllt. Die Holzspäne aus dem Zerspanungsvorgang könnten beim digitalen Blockhausbau als Dämmung dienen. So wäre für eine optimale Verwertung gesorgt.

Klimaschutz

Der Primärenergiebedarf eines Massivholzhauses liegt 15 Prozent unter dem eines Ziegelhauses, dabei spart ein Holzhaus 32 Prozent an Treibhausgasen im Vergleich zur Standardbauweise. Dies entspricht einem Kohlendioxid-Äquivalent von 51,5 Tonnen über einen Zeitraum von 50 Jahren. Ein normaler PKW stößt diese Menge CO₂ auf einer Strecke von 400.000 km aus.²⁹ Diese Zahlen verdeutlichen den Vorteil des Massivholzbaus im Allgemeinen, in weiteren Forschungen könnte berechnet werden welches zusätzliche Potenzial sich aus der direkten Bearbeitung von Baumstämmen in der digitalen Blockhausfabrikation ergibt. Des Weiteren könnte untersucht werden, welchen Vorteil die Verwertung von Totholz für die langfristige CO₂ Bindung, im Vergleich zu der langsamen Zersetzung des Stammes im Wald, bietet.

Quellenverzeichnis

- 1 Holzfehler Abholzigkeit
<https://holz-kahrs.de/lexikon/abholzigkeit/>
letzter Aufruf 23.05.2020
- 2 Birgit Gruber
Das geht unter die (Schlangen-)Haut
<https://www.holzbauaustria.at/architektur/2020/01/swatch-gebaeude-in-biel.html>
letzter Aufruf 22.05.2020
- 3 Zachary Mollica, Martin Self
Tree Fork Truss: Geometric Strategies for Exploiting Inherent Material Form,
in Advances in Architectural Geometry 2016, S.145-146, 2016, vdf Hochschul-
verlag AG an der ETH Zürich, ISBN 978-3-7281-3778-4
letzter Aufruf 22.05.2020
- 4 Robert Mehl
Timber Prototype House: moderner Blockbau
https://www.dach-holzbau.de/artikel/timber-prototype-house-als-moderner-blockbau_3423373.html
letzter Aufruf 22.06.2020
- 5 Karl Klöckner
Der Blockbau. Massivbauweise in Holz, S. 9, Callwey Verlag,
1982. ISBN: 376670608X
- 6 Ibid., S.15
- 7 Ibid., S.15
- 8 Ibid., S. 27
- 9 Ibid., S. 12-13
- 10 Ibid., S. 13-14
- 11 Ibid., S. 15
- 12 Ibid., S. 17
- 13 Ibid., S. 20
- 14 E. Thoma
Bausystem Holz100 Planungshandbuch
https://www.thoma.at/cms/wp-content/uploads/2019/02/planungshandbuch_v1_2019_web_rgb.pdf
letzter Aufruf 22.05.2020
- 15 Quadratmeterpreis moderner Blockhausbau
<https://www.palmatin.com/faq/are-log-homes-cheaper-to-build-compared-to-houses-from-other-materials/>
letzter Aufruf 24.06.2020

- 16 Dimitrios Kraniotis et al.
Moisture buffering and latent heat of sorption of a wood-based insulating sandwich panel, im Buch: Proceedings of World Conference on Timber Engineering, 2016, Vienna University of Technology,
https://www.researchgate.net/publication/307558730_Moisture_buffering_and_latent_heat_of_sorption_of_a_wood-based_insulating_sandwich_panel
letzter Aufruf 23.05.2020

- 17 Klaus Richter, Gabriele Ehmke
Das Holz der Fichte – Eigenschaften und Verwendung – LWF Wissen 80
<https://www.lwf.bayern.de/forsttechnik-holz/holzverwendung/172486/index.php>
letzter Aufruf 23.05.2020

- 18 Klaus Richter, Gabriele Ehmke
Das Holz der Fichte – Eigenschaften und Verwendung – LWF Wissen 80
<https://www.lwf.bayern.de/forsttechnik-holz/holzverwendung/172486/index.php>
letzter Aufruf 23.05.2020

- 19 Dietger Grosser, Gabriele Ehmcke
Das Holz der Lärche – Eigenschaften und Verwendung, S. 68
http://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/waldschutz/dateien/das_holz_der_laerche_w69.pdf
letzter Aufruf 23.05.2020

- 20 Tomáš Přívětivý, Petr Baldrian, Pavel Šamonil, Tomáš Vrška
Deadwood Density and Moisture Variation in a Natural Temperate Spruce-Fir-Beech Forest, S.12
<https://www.preprints.org/manuscript/201705.0215/v1/download>
letzter Aufruf 23.05.2020

- 21 Deutscher Wetterdienst, Jahresbericht 2018 und 2019
https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20181228_deutsch_landwetter_jahr2018_news.html
letzter Aufruf 23.05.2020
https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2019/20191230_deutsch_landwetter_jahr2019.pdf?__blob=publicationFile&v=3
letzter Aufruf 23.05.2020

- Waldschäden: Bundesministerium veröffentlicht aktuelle Zahlen
<https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2020/040-waldschaeden.html;jsessionid=79BB2852A91AABB2D5050B70A66D17FA.internet2851>
letzter Aufruf 23.05.2020

- 22 Landesforstanstalt leidet unter Situation am Holzmarkt
https://www.proplanta.de/agrar-nachrichten/wald-forst/landesforstanstalt-leidet-unter-situation-am-holzmarkt_article1582252076.html
letzter Aufruf 18.05.2020

- 23 Forstexperten bezeichnen Zustand der Wälder als katastrophal
<https://www.mdr.de/thueringen/experten-nennen-zustand-der-thueringer-waelder-katastrophal-100.html#sprung0>
letzter Aufruf 23.05.2020

- 24 Entrindung von Baumstämmen
https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/forsttechnik-holz/dateien/w71_poltern_ohne_rinde_bf_gesch.pdf
letzter Aufruf 10.06.2020

- 25 P. Fankhauser et al.
Kinect v2 for Mobile Robot Navigation:Evaluation and Modeling, Kapitel V.
https://www.researchgate.net/publication/277166118_Kinect_v2_for_Mobile_Robot_Navigation_Evaluation_and_Modeling

- 26 P. Fankhauser et al.
Kinect v2 for Mobile Robot Navigation:Evaluation and Modeling, Table I.
https://www.researchgate.net/publication/277166118_Kinect_v2_for_Mobile_Robot_Navigation_Evaluation_and_Modeling

- 27 Karl Klöckner
Der Blockbau. Massivbauweise in Holz, S. 9, Callwey Verlag,
1982. ISBN: 376670608X

- 28 JORO-3D Vollkonturscanner
<https://je-gmbh.de/produkte/joro-3d>
letzter Aufruf 24.06.2020

- 29 H. König
Aktiver Klimaschutz durch Ressourceneffizienz und Nachwuchspotenzial des Holzbaus am Beispiel von zwei Neubauten und drei Sanierungsprojekten.
<https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-30866.pdf>
letzter Aufruf 24.06.2020
Geo Ausgabe 05/20, Klaus Bachmann, Artikel: Holz in Hochform, S.134

Literaturverzeichnis

Sigrid Adriaenssens, Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Achim Menges, Mark Pauly
Advances in Architectural Geometry 2016, 2016, vdf Hochschulverlag AG an der ETH
Zürich, ISBN 978-3-7281-3778-4

<http://vdf.ch/advances-in-architectural-geometry-2016.html>

letzter Aufruf 23.05.2020

Luis Felipe González Böhme, Francisco Quitral Zapata, Sandro Maino Ansaldo
Roboticus tignarius: robotic reproduction of traditional timber joints for the reconstruction
of the architectural heritage of Valparaíso, 2017

https://www.researchgate.net/publication/318430734_Roboticus_tignarius_robotic_reproduction_of_traditional_timber_joints_for_the_reconstruction_of_the_architectural_heritage_of_Valparaíso

letzter Aufruf 23.05.2020

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
Waldschäden: Bundesministerium veröffentlicht aktuelle Zahlen

<https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2020/040-waldschaeden.html;jsessionid=79BB2852A91AABB2D5050B70A66D17FA.internet2851>

letzter Aufruf 23.05.2020

Jane Burry, Jenny Sabin, Bob Sheil, Marilena Skavara
Fabricate 2020: Making Resilient Architecture, 2020, UCL Press, ISBN 9781787358119

<https://www.uclpress.co.uk/products/154646>

letzter Aufruf 23.05.2020

dpa/th, Landesforstanstalt leidet unter Situation am Holzmarkt

https://www.proplanta.de/agrar-nachrichten/wald-forst/landesforstanstalt-leidet-unter-situation-am-holzmarkt_article1582252076.html

letzter Aufruf 18.05.2020

Deutscher Wetterdienst, Jahresbericht 2018 und 2019

https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20181228_deutschlandwetter_jahr2018_news.html

letzter Aufruf 23.05.2020

https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2019/20191230_deutschlandwetter_jahr2019.pdf?__blob=publicationFile&v=3

letzter Aufruf 23.05.2020

Péter Fankhauser et al.

Kinect v2 for Mobile Robot Navigation: Evaluation and Modeling, Table I.

https://www.researchgate.net/publication/277166118_Kinect_v2_for_Mobile_Robot_Navigation_Evaluation_and_Modeling

letzter Aufruf 23.05.2020

Dietger Grosser, Gabriele Ehmcke

Das Holz der Lärche – Eigenschaften und Verwendung, S. 68

http://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/waldschutz/dateien/das_holz_der_laerche_w69.pdf letzter Aufruf 23.05.2020

Birgit Gruber

Das geht unter die (Schlangen-)Haut

<https://www.holzbauaustria.at/architektur/2020/01/swatch-gebaeude-in-biel.html>

letzter Aufruf 22.05.2020

Emanuel Jannasch

Embodied Information in Structural Timber, im Buch: Structures and Architecture: New concepts, applications and challenges, 2013

https://www.researchgate.net/publication/299944096_Embodied_information_in_structural_timber letzter Aufruf 23.05.2020

JORO-3D Vollkonturscanner

<https://je-gmbh.de/produkte/joro-3d>

letzter Aufruf 24.06.2020

Karl Klöckner

Der Blockbau. Massivbauweise in Holz,

Callweg Verlag, 1982. ISBN: 376670608X

H. König

Aktiver Klimaschutz durch Ressourceneffizienz und Nachwuchspotenzial des Holzbaus am Beispiel von zwei Neubauten und drei Sanierungsprojekten.

<https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-30866.pdf>

letzter Aufruf 24.06.2020

Dimitrios Kraniotis, Nathan Langouet, Thomas Orskaug, Kristine Nore, Geir Glaso
Moisture buffering and latent heat of sorption of a wood-based insulating sandwich panel,
im Buch: Proceedings of World Conference on Timber Engineering, 2016, Vienna University of Technology

https://www.researchgate.net/publication/307558730_Moisture_buffering_and_latent_heat_of_sorption_of_a_wood-based_insulating_sandwich_panel

letzter Aufruf 23.05.2020

Robert Mehl

Timber Prototype House: moderner Blockbau

https://www.dach-holzbau.de/artikel/timber-prototype-house-als-moderner-blockbau_3423373.html

letzter Aufruf 23.05.2020

Achim Menges, Bob Sheil, Ruairi Glynn, Marlinea Skavara

Fabricate 2017: Rethinking design and construction, 2017, UCL Press,

ISBN: 9781787350007

<https://www.uclpress.co.uk/products/89027>

letzter Aufruf 23.05.2020

Zachary Mollica, Martin Self

Tree Fork Truss: Geometric Strategies for Exploiting Inherent Material Form, in Advances in Architectural Geometry 2016, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, ISBN 978-3-7281-3778-4

Gerd Nettelroth, Forstexperten bezeichnen Zustand der Wälder als katastrophal

<https://www.mdr.de/thueringen/experten-nennen-zustand-der-thueringer-waelder-katastrophal-100.html#sprung0>

letzter Aufruf 23.05.2020

Tomáš Přivěťivý, Petr Baldrian, Pavel Šamonil, Tomáš Vrška

Deadwood Density and Moisture Variation in a Natural Temperate Spruce-Fir-Beech Forest

<https://www.preprints.org/manuscript/201705.0215/v1/download>

letzter Aufruf 23.05.2020

Klaus Richter, Gabriele Ehmke

Das Holz der Fichte – Eigenschaften und Verwendung – LWF Wissen 80

<https://www.lwf.bayern.de/forsttechnik-holz/holzverwendung/172486/index.php>

letzter Aufruf 23.05.2020

Christoph Schindler, Martin Tamke, Ali Tabatabai, Martin Bereuter, Hironori Yoshida

Processing Branches: Reactivating the performativity of natural wooden form with contemporary information technology, International Journal of Architectural Computing 12, 2014, https://www.researchgate.net/publication/279230743_Processing_Branches_Reactivating_the_performativity_of_natural_wooden_form_with_contemporary_information_technology

letzter Aufruf 24.05.2020

Helmut Schlichtherle

Der Federsee, das fundreichste Moor der Pfahlbauforschung. In: Pfahlbauten rund um die Alpen, Archäologie in Deutschland, Sonderheft 1997. Theiss Verlag, Stuttgart 1997, ISBN 3-8062-1146-9

Bob Sheil, Mette Ramsgaard Thomsen, Martin Tamke, Sean Hanna

Design Transactions: Rethinking Information Modelling for a New Material Age, 2020, UCL Press, ISBN: 9781787355026

<https://www.uclpress.co.uk/products/141560>

letzter Aufruf 23.05.2020

Piotr Siekański, Krzysztof Magda, Krzysztof Malowany, Jan Rutkiewicz, Adam Styk, Jakub Krzesłowski, Tomasz Kowaluk, Andrzej Zagórski, On-Line Laser Triangulation Scanner for Wood Logs Surface Geometry Measurement
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6427530/>
letzter Aufruf 23.05.2020

E. Thoma
Bausystem Holz100 Planungshandbuch
https://www.thoma.at/cms/wp-content/uploads/2019/02/planungshandbuch_v1_2019_web_rgb.pdf
letzter Aufruf 22.05.2020

Oliver Wasenmüller, Didier Stricker
Comparison of Kinect v1 and v2 Depth Images in Terms of Accuracy and Precision, 2016
https://www.dfki.de/fileadmin/user_upload/import/8767_wasenmuller2016comparison.pdf
letzter Aufruf 23.05.2020

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 <https://www.baunetzwissen.de/bim/objekte/buero-verwaltung/firmenhauptsitz-swatch-in-biel-7031670/gallery-1/12> letzter Aufruf 19.05.2020

Abb. 2 https://pr2016.aaschool.ac.uk/submission/uploaded_files/DESIGN-AND-MAKE/2014-15:%20Woodchip%20Barn-02_Hooke_D&M_Woodchip_Barn_completed_VB_2016_02_08_021.jpg letzter Aufruf 19.05.2020

Abb. 3 https://www.dach-holzbau.de/artikel/timber-prototype-house-als-moderner-blockbau_3423373.html Foto von Hans Drexler / Jade Hochschule
letzter Aufruf 19.05.2020

Abb. 4–6 Screenshots aus Blockhausbau Video
<https://www.youtube.com/watch?v=GI0sJOcY7ow> letzter Aufruf 22.06.20

Abb. 7 Karl Klöckner, Der Blockbau. Massivbauweise in Holz, S. 14,
Callwey Verlag, 1982. ISBN: 376670608X

Abb. 8 Ibid., S. 13

Abb. 9 Ibid., S. 13

Abb. 10 Ibid., S. 13

Abb. 11 Ibid., S. 16

Abb. 12 Ibid., S. 16

Abb. 13 Ibid., S. 17

Abb. 14 Ibid., S. 16

Abb. 15 Ibid., S. 18,

Abb. 16 Ibid., S.18

Abb. 17 Ibid., S. 17

Abb. 18 Ibid., S. 17

Abb. 19 Ibid., S. 17

Abb. 20 Ibid., S. 19

Abb. 21 Ibid., S. 19

Abb. 22 Aktueller Blockhausbau
https://www.blockhaus-barth.de/grundrisse_entwuerfe.php

Abb. 23 Eigene Darstellung

Abb. 24 Eigene Darstellung, Bildgrundlage
<http://www.massivblockhaus.de/img/wandsysteme.jpg> letzter Aufruf 22.05.2020

Abb. 25–68 Eigene Darstellungen

Abb. 65 Eigene Darstellung, Bildgrundlage
<http://www.massivblockhaus.de/img/wandsysteme.jpg> letzter Aufruf 22.05.2020

Danksagungen

Mein besonderer Dank gilt Vertr.-Prof. Dr. Sven Schneider, Prof. Dr. Jan Willmann und Dr.-Ing. Stephan Schütz für die Betreuung dieses Projektes. Außerdem möchte ich meinen Eltern danken. Sie haben mir immer tatkräftig mit Rat und Tat zur Seite gestanden. Zuletzt gilt meine große Dankbarkeit Isabella Glock, der besten Lektorin der Welt.

Autor**Lukas Kirschnick**

B. Sc. Architektur

Rudolf-Breitscheid-Straße 19

99423 Weimar

T.: 051777459607

E-Mail: lukas.kirschnick@uni-weimar.de

Matrikelnummer: 113295

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Die wörtlich oder inhaltlich den im Literaturverzeichnis aufgeführten Quellen und Hilfsmitteln entnommenen Stellen sind in der Arbeit als Zitat bzw. Paraphrase kenntlich gemacht. Diese Masterthesis ist noch nicht veröffentlicht worden. Sie ist somit weder anderen Interessierten zugänglich gemacht noch einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

Ort, Datum: Weimar, 25.06.2020

Gutachter: Vertr.-Prof. Dr. Sven Schneider

Zweitgutachter: Prof. Dr. Jan Willmann

Drittgutachter: Dr.-Ing. Stephan Schütz

.....