



Dialogplattform „Weiterentwicklungen im Holzbau“

Kurzbericht Workshop „Innovative Concepts for Glued Connections in Timber Constructions“

Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau Biel/Bienne
15. und 16. Oktober 2015

Autorin: Jutta Glanzmann Gut
30. November 2015

Inhalt, Ziel und Ablauf des Workshops

Die Frage der automatisierten Fertigung von Holzbauten mittels Robotik stellt neue Anforderungen an die Holzverbindungen. Diese müssen entweder einfach und schnell ausführbar sein und einen niedrigen Wirkungsgrad besitzen. Oder man setzt auf wenige, aufwändige Verbindungen mit einem hohen Wirkungsgrad – ähnlich dem klassischen Ingenieurbau. Aktuell scheint klar, dass unter den herkömmlichen Verbindungsarten für diese Anwendung kaum zufriedenstellende Lösungen bestehen. Ein möglicher Ansatz ist der Einsatz von ultraschnellen, injizierten Klebstoffen, um die Verbindungstechnologie im Rahmen der automatisierten Fertigung weiterzuentwickeln. Dies wird gegenwärtig im Rahmen des Teilprojekts „Robotergestützte Assemblierung komplexer Holztragwerke“ des NFP 66 vom Team um Christophe Sigrist an der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, untersucht. Der zweitägige Workshop in Biel hatte zum Ziel, die Resultate, die dazu bereits vorliegen, im Rahmen eines fachlichen Austauschs mit anderen Forschern (Fachgebiete: Fertigungstechnik und Materialforschung, digitale Fabrikation, Ingenieurholzbau, Holz- und Bauklebstoffe, Architektur) und Teilnehmenden aus der Praxis (Holzbau, Klebstoffindustrie) zu diskutieren und Antworten auf aktuelle Fragestellungen zu erhalten. Konkret ging es um folgende Punkte:

- Problematik und Lösungsansätze von komplexen (Kleb-)Verbindungen austauschen
- Neue Ideen und Konzepte für komplexe (Kleb-)Verbindungen entwickeln
- Potenzial in Bezug auf eine Weiterentwicklung der Lösungen abschätzen und mögliche Forschungsfelder identifizieren

Fragen der robotergestützten Fertigung (wie kommen die einzelnen Holzbauteile beispielsweise an die richtige Stelle, wie muss die Geometrie aussehen, etc.) und der damit verbundenen Wechselwirkungen mit der Architektur, wurden am Rande diskutiert, standen aber als Thema nicht im Fokus des Workshops.

Die beiden Tage liefen werkstattartig ab: Neben Inputreferaten der anwesenden Experten aus Forschung und Praxis wurden in Gruppen die jeweils anstehenden Fragen und Themen besprochen und danach im Plenum vorgestellt. Folgend werden die Inhalte der jeweiligen Inputreferate und die Resultate der Fachdiskussionen sowie das Fazit des zweitägigen Workshops kurz zusammengefasst.

Thematische Einführung durch Christophe Sigrist, Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, Biel

Neben mehrgeschossigen Holzbauten liegen auch sehr grosse Tragwerke aus Holz im Trend. Mögliche freie Formen bestehen aus vielen Stäben, wobei prinzipiell keiner dem anderen gleicht. Die Herausforderung bei einer automatischen Fertigung besteht darin, dass jeder Stab an der richtigen Stelle sowie im richtigen Winkel platziert und dann korrekt verbunden wird. Als Basis wurden im Rahmen des Forschungsprojekts alle möglichen Verbindungen systematisiert (Grad der Freiheit: null bis völlig frei) und bewertet (welche Verbindungen eignen sich für den Einsatz eines Roboters).

Folgend wurden Anforderungen an Verbindungen für den Robotereinsatz definiert: Sie müssen hohe Toleranzen aufnehmen können, automatisierbar, tragfähig und einfach sein. Ausgehend von der These, dass ein möglicher Lösungsansatz darin besteht, die Teile durch Injektion von Kleber miteinander zu verbinden, wurde mittels Roboter ein räumliches Holzstabtragwerk hergestellt (als Vision) und die Eigenschaften eines dafür möglicherweise geeigneten Klebers (von Nolax AG entwickelt) untersucht. Da es sich um räumliche Verbindungen handelt, ist die wichtigste Frage: Wie müssen diese beschaffen sein, damit sie multiaxial belastbar sind? Normalkräfte (Zug oder Druck), Querkkräfte, Biegemomente und Torsionskräfte verschiedener Grösse können gleichzeitig auftreten und erzeugen mehrachsige Beanspruchungen im Holzquerschnitt. Aufgrund der komplexen Geometrie von frei geformten Tragwerken, wo Stäbe gedreht und unter flachen Winkeln auftreten können, liegen oft nur kleine Kontaktflächen zur Kraftabtragung zur Verfügung. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde versucht, die Schnittkräfte über eine Profilierung und/oder Oberflächenbearbeitung von Stäben zu erreichen. Als „Backup-Lösung“ könnten prinzipiell auch spezielle Verbindungsmittel, Formteile oder ähnliches verwendet werden.

Als nächster Schritt wurden prototypische Versuche (nicht systematisch, eher nach dem Prinzip trial and error) durchgeführt, indem jeweils zwei Teile mittels Klebstoff verbunden wurden und dann auf Zug (parallel und senkrecht zur Faserrichtung), auf Schub und bezüglich der Interaktion von Normalkraft N + Querkraft V geprüft wurden. Zusätzlich wurden in einzelnen Versuchen die Kontaktflächen bearbeitet (mittels Perforation), mit dem Ziel den Kleber besser ins Holz einzubringen. Die auftretenden Versagensarten waren:

- Adhäsiver Bruch der Grenzschicht zwischen Klebstoff und Stirnholz
- Holzbruch durch eine kombinierte Beanspruchung (Schub/Querzug) in der Nähe der Schwerachse
- Holzbruch durch Querzug in der Nähe der Verbindung

- Gemischtes Versagen durch eine kombinierte Beanspruchung aus Schub und Querzug sowie reines Querzugversagen

Aus dieser Ausgangslage ergeben sich folgende spezifische Fragen, auf die man sich im Rahmen des Workshops Antworten erhofft:

- Sind tragende Klebeverbindungen sinnvoll?
- Ist es möglich, Klebungen am Hirnholz/an schräg angeschnittenen Fasern durchzuführen?
- Wie muss die Oberfläche der zu verbindenden Holzquerschnitte aussehen?
- Wie soll das Querschnittsprofil aussehen, damit die Klebefläche hauptsächlich auf Abscheren beansprucht wird?
- Wie lässt sich vermeiden, dass in einem Querschnitt der Verbindung die Gesamtlast auf Zug über den Kleber weitergeleitet wird?

Inputreferat Wieland Becker: Knotenlösungen für den Holzbau oder wie können wir uns von der Natur inspirieren lassen?

Fachhochschule Trier (D)

Die Natur (Ast), die Medizin (Hüftgelenk) oder das Beil vom Steinzeitmenschen Ötzi (Verbindung mit verstärktem Knoten) sind Vorbilder für mögliche Verbindungen im Holzbau. Formal ist heute mittels digitaler Fabrikation fast alles realisierbar. Im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung ist es deshalb wichtig zu fragen, was material-, umwelt- und holzbaugerecht ist. Ausgehend vom Vorbild des Knotenpunkts einer Astgabelung wurden für ein Forschungsprojekt der Hochschule Trier Gussformteile (das dafür verwendete Material Ferroguss kommt sonst im Maschinenbau zum Einsatz) für die Verbindung der Stützen entwickelt, die eine offene Dachstruktur tragen: Diese verbinden „knotenartig“ Stützen aus Rundholz aus dem Wald, dessen Festigkeitseigenschaften bekannt sind. Das Projekt namens „Tripod“ wurde mit dem Deutschen Holzbaupreis 2013 ausgezeichnet. Dieselbe Konstruktionstechnik wurde für die Erstellung einer Brücke verwendet (Ausbildung der Fachwerkknoten). Ein anderer möglicher Lösungsansatz ist der Inlay-Technologie entlehnt, bei der besonders hoch beanspruchte Bereiche mit einem Zusatz aus Mineralguss verstärkt werden. Das Funktionsprinzip der Montage von Vergussknoten bei Holz-Stahl-Verbindungen erfolgt in vier Schritten: Erstellen der Verbindung am Holzquerschnitt (z.B. durch Verkleben), positionieren und verbinden der Bauteile, koppeln und sichern der Verbindung, vergiessen der Verbindung. Die Inlay-Technologie stellt eine Weiterentwicklung von bestehenden Verbindungen dar. Bereits normativ oder zulassungsgemäss geregelte Stahlformteile wie Gewindestangen, Betonstabstähle, gelaserte Lochbleche, ggf. Schrauben werden in das Holz eingebracht und vergossen. Das Vergiessen der Stahlformteile führt zur Erhöhung der Steifigkeit (Gebrauchstauglichkeit) und zum Toleranzausgleich. Gleichzeitig wird der „Schlupf“ in der Verbindung eliminiert. Dank dieser Technik werden Eigenschaften von verschiedenen Materialien und Komponenten (vom Holz E-Modul von 10'000 N/mm² bis zum Stahl E-Modul von 210'000 N/mm²) kombiniert und die kritischen Verbindungen verstärkt.

Ein weiteres Projekt der Hochschule Trier arbeitet mit „gefaltetem Holz“. Dabei wird Birkenfurnier entlang der Faltlinie perforiert und mit einem Gussmaterial verstärkt. Ein Prototyp eines solchen Plattenverbundes wurde bereits hergestellt. Ein Vorteil des patentrechtlich geschützten Verfah-

rens besteht in den vereinfachten Abbundprozessen. Es sind lediglich Sägeschlitze oder Bohrungen erforderlich, komplexe und aufwändige Schweissteile entfallen.

Zusammenfassung der Ergebnisse der ersten Diskussionsrunde in Gruppen

In einer ersten Diskussionsrunde wurde der Fächer der Thematik geöffnet und das Prinzip sowie Vor- und Nachteile von Klebeverbindungen in Frage gestellt. Im Vordergrund standen Aspekte der Fertigung, Gütesicherung, Tragfähigkeit und allfällige Alternativen zum Klebstoff oder Kombinationen mit Klebstoff.

Gruppe 1: Anforderungen an die Verbindungen

Folgende Fragen müssen im Zusammenhang mit den angestrebten Holzklebeverbindungen diskutiert werden:

- Wie erreicht man die geforderte Duktilität des Klebstoffs?
- Für jeden Knoten, der ausfallen kann, muss ein alternativer Lastfall gezeigt werden (Redundanz).
- Wie werden Toleranzen ausgeglichen? (Anmerkung: Für baupraktische Anwendungen ist der Toleranzausgleich kein Problem)
- Wie lassen sich Flächen- und Volumen aktivieren? Was sind die Anforderungen an die Stirnfläche?
- Wie verhalten sich die Verbindungen bei Lastwechsel und Langzeitbelastung?

Ein möglicher Lösungsansatz könnte sein: Eine Kombination von Verleimung und mechanischer Verbindung bietet eine Verankerung, auch wenn die Adhäsion versagt (Anmerkung: die Steifigkeiten der verschiedenen Materialien sind in der Regel sehr unterschiedlich und müssten genau abgestimmt werden).

Gruppe 2: Vor- und Nachteile von Klebeverbindungen oder Klebetechniken

Es wurde die reine Klebeverbindung mit dem Einkleben von mechanischen Verbindungsteilen verglichen. Auch hier wurden im Zusammenhang mit der reinen Klebeverbindung folgende Fragen aufgeworfen: Wie sieht es mit der Duktilität des Klebstoffs aus? Welche Versagensarten werden erzielt? Wie ist die Tragfähigkeit und wie kann diese berechnet werden? Wie muss die Oberfläche behandelt werden – lassen sich beispielsweise am Stirnholz die Fasern (chemisch) auflösen, um sie dann „zusammenzugiessen“?

Es wurde festgehalten, dass mit dem Weglassen einer Hochleistungsverbindung mittels Stahl oder ähnlichem die Anforderungen an den Klebstoff (Duktilität etc.) steigen. Weiter wurde diskutiert, ob die Holzteile stumpf oder mittels Keilverzinkung verbunden werden sollten. Denn aus rein mechanischer Sicht lasse sich nicht begründen, weshalb die Keilverzinkung besser sein solle als eine stumpf gestossene Verbindung.

Gruppe 3: Praxistauglichkeit der Klebmethoden

Zunächst stellte man die Frage nach der Relevanz der untersuchten Methode, da diese für 95 Prozent der zu erstellenden Gebäude keine Rolle spiele. Abgesehen davon sei die Qualitätssicherung sehr wichtig („ein Kleber hält zu 100 Prozent oder gar nicht, es gibt kein Zwischending“), eventuell

wäre es sinnvoll, die Roboter nicht nur zum Bauen der Tragwerke, sondern auch zu deren Kontrolle einzusetzen. Weiter wurde die Frage der Präzision diskutiert. Laut Projektbeteiligten seitens der ETH wurde angemerkt, dass schon eine sehr hohe Präzision im Millimeterbereich erreichbar sei. Aus Sicht des praktischen Holzbaus sei eine hochpräzise Verbindung aber unrentabel, so ein Vertreter aus der Holzbaubranche. Wichtig sei, dass man immer auch die ökonomische Seite einer Lösung berücksichtige und deshalb eine vertretbare Toleranz anstrebe, die nicht unbedingt dem höchstmöglichen Präzisionsgrad entsprechen müsse.

Inputreferat Peter Zock: Automatisierung, Klebtechnologie, Stand der Implementierung Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, Biel

Ein wichtiger Teil des Projekts „Robotergestützte Assemblierung komplexer Holztragwerke“ ist die Frage, wie die einzelnen Teile eines räumlich strukturierten Tragwerks miteinander verbunden werden können. Grundsätzlich gibt es drei Möglichkeiten, diese zu verbinden:

1. Mittels Reibung (Beispiel vorgespannte Holzbrücken)
2. Durch einen Formschluss
3. Durch Adhäsion (zum Beispiel durch Verklebung oder mittels chemischer Reaktion)

Wichtig ist zudem, die Materialeigenschaften des Holzes (Faserrichtung) zu berücksichtigen. Ausgehend von der Voraussetzung der automatisierten Fabrikation mit ihrer besonderen Charakteristik (Aufnahme von Toleranzen, wenige Prozesskräfte, räumliche Anschlüsse etc.) entschied man sich, verschiedene Verbindungen mit einem Klebstoff von Nolax zu testen, der aufgrund seiner Eigenschaften dafür geeignet schien:

1. Kombination von Holz und Leim (Ergebnis: geringste Tragfähigkeit)
2. Kombination von Holz und Leim und bearbeiteter Oberfläche (Ergebnis: höhere Tragfähigkeit im Vergleich zu 1)
3. Kombination von Holz und Leim und zusätzlichem Mittel (Ergebnis: komplex in Bezug auf Handling)

Man entschied sich, mit weiteren Versuchen den Punkt 2 (Kombination von Holz und Leim und bearbeiteter Oberfläche) weiterzuerfolgen. Dabei wurden die Oberflächen der zu verbindenden Teile mittels Perforation (ca. 8 mm tief) oder einer Kegelbohrung (ca. 45 mm tief) bearbeitet. Als Referenz für die Zugprüfung diente die stumpfe Verbindung. Dabei zeigte sich, dass man durch die Perforation resp. die Bohrung im Vergleich dazu eine doppelte Festigkeit erreichte. Die Bruchbilder zeigten zum Teil Materialversagen, bei sehr festem Material gab es Bruchbilder im Bereich der Verleimung. Einzelne Verbindungen (Oberflächen perforiert) wurden auch auf Schub getestet. Der verwendete Klebstoff hat folgende Eigenschaften: Zugfestigkeit 21 N/mm², E-Modul 375 N/mm², Kriechverhalten unbekannt. Aktuell stellt sich die Frage, welche Versuche noch gemacht werden müssten, um im Projekt einen Schritt weiterzukommen?

Zusammenfassung der Ergebnisse der zweiten Diskussionsrunde in Gruppen

Die Thematik der komplexen Tragwerke wurde im Rahmen des NFP-Projekts in drei Teilprojekte unterteilt: Tragwerk/Architektur, Verbindung/Tragfähigkeit, Robotik/Prozesse. In jedem Teilprojekt liegen unzählige Fragestellungen vor, welche miteinander verknüpft und voneinander abhän-

gig sind. Optimierungen auf der einen Seite führen sofort zu (grossen) Auswirkungen auf der anderen Seite. Die Ergebnisse im Teilprojekt Verbindung/Tragfähigkeit stossen allgemein auf Interesse, das grosse Potenzial von solch neuartigen Klebeverbindungen wird erkannt. Die Teilnehmer des Workshops empfehlen, die spannende Aufgabenstellung zu abstrahieren und die Forschung vorerst auf die wesentlichen, grundsätzlichen Fragestellungen zu konzentrieren. Im Vordergrund sollen weiterhin die Machbarkeit und das Potenzial der innovativen Klebeverbindung stehen.

Gruppe 1

Interessant wäre eine Versuchsreihe mit verschiedenartigen Perforierungen, um herauszufinden, welche Perforierung das Optimum erreicht. An die einschlägigen Normen angelehnte Versuche zur Beurteilung der Querkzugfestigkeit und Scherversuche sollen durchgeführt werden, um eine Vergleichsmöglichkeiten zu „Standard“ Klebstoffen mit bekannten Eigenschaften herzustellen. Weiter müsste das Kriechverhalten und das langfristige Verhalten untersucht werden, wenn möglich mit verschiedenen Klebstoffen.

Gruppe 2

Es wäre interessant, die Verbindung von zwei Elementen zu testen, die in verschiedenen Winkeln zueinander stehen. Mit dem Ziel, auch für diese Fragestellung systematische Antworten zu erhalten.

Weitere Punkte, die diskutiert wurden: Ist es möglich, kleine, zweidimensionale Tragwerke zu prüfen? Hat man sich überlegt, Klebstoffe mit höheren Zugfestigkeiten zu prüfen? Was bringt eine punktuelle Verstärkung im Bereich des jeweiligen Materialbruchs? Wurde auch eine Scherprüfung durchgeführt?

Gruppe 3

Zum einen stellt sich die prinzipielle Frage, welche Versuche notwendig sind? Zum anderen könnte ein möglicher Ansatz sein, reine Versuche mit Klebstoffen durchzuführen (Kriecheigenschaften, zulassungsrelevante Prüfungen etc.). Eventuell ist es sinnvoll, ein KTI-Projekt mit verschiedenen Industriepartnern aus den folgenden Bereichen anzustreben: Innovative Klebeverbindung, komplexe Tragwerke, Automatisierung.

Inputreferat Simon Aicher: Randbedingungen und innovative Konzepte für Klebeverbindungen

Universität Stuttgart

Nach einer kurzen Zusammenfassung der wichtigsten Punkte des europäischen Normenwerks der Klebstoffe sowie einer Klassifizierung geklebter Vollstösse aus Holz im Vergleich zu Stahlbeton und Stahlbau (Wirkungsgrad $\eta = 1$) folgte eine Präsentation des Systems Hess Limitless. Dabei handelt es sich um einen patentierten hochfesten Binderstoss, der entwickelt wurde, um lange Brettschichtholzbinden wirtschaftlich und ohne komplizierte Transportabwicklungen einsetzen zu können. Hess Limitless besteht aus den folgenden drei Komponenten: Generalkeilzinkenstoss, Schäftungskeil im Randbereich des Trägers und einer Premiumlamelle. Der Binderstoss wird auf der Baustelle verklebt. So konnte beispielsweise die längste Holzfussgängerbrücke Europas (505 m) in Anaklia, Georgien, erstellt werden.

Das Fazit:

- Neue geklebte Verbindungstechniken ermöglichen nachweislich Wirkungsgrade von 1.0 (Holzbau = Stahlbau).
- „Rapid, cold, wet and hybrid wood gluing“ wird dem Holzbau neue Potenziale eröffnen.
- Heutige normative Herstellungsbedingungen könnten für einige Anwendungsbereiche in Verbindung mit speziellen Klebstoffprodukten ohne Beeinträchtigung der Sicherheit gelockert werden (Voraussetzung: Nachweisverfahren in Anlehnung an existierende Normen).

Inputreferat Anton Brandmeier,

Nolax AG

Im Vergleich zum herkömmlichen Klebprozess, der sich aus verschiedenen Schritten zusammensetzt, die zeitlich definiert sind, ist das Injektionskleben ein trockenes Verfahren, das in erster Linie auf dem Einspritzen des Klebers in einen Hohlraum basiert. Damit lassen sich die zwei zu klebenden Teile quasi auf Knopfdruck verbinden und man gewinnt viel Zeit. Polyurea Klebstoffe erreichen bereits nach zwölf Stunden ca. 80 Prozent der Endfestigkeit. Allerdings braucht es dafür die entsprechende Anlagentechnik. Gemischt wird mittels eines Kammersystems, das sehr präzise einstellbar ist. Injektionskleben findet Anwendung beispielsweise im Möbelbau oder bei komplizierten Querschnitten.

Fazit

Im Fokus des Workshops stand die Frage der Verbindung der Holzteile mittels Klebstoff im Kontext des Projekts „Roboterassistierte Assemblierung komplexer Holztragwerke“. Die zwei Tage haben gezeigt, dass mit der Frage der Klebeverbindung von Holz zwar ein ambitioniertes Ziel verfolgt wird, dieses aber durchaus Potenzial hat. Aufbauend auf den Ergebnissen und Inputs der beiden Diskussionsrunden soll nun das geplante Vorgehen im zweiten Teil des Forschungsprojekts (dieses ist bewilligt und aufgrund der Eingabe auch inhaltlich definiert) nochmals kritisch beleuchtet und allenfalls angepasst werden. Insbesondere auch im Hinblick auf das Realisierungspotenzial der Forschungsergebnisse in der Praxis, das eines der Ziele der zweiten Phase des Forschungsprojekts ist. Dazu gehören beispielsweise Fragen nach einer möglichst effizienten Montagelösung oder nach ökonomischen Aspekten (Anzahl der Verbindungen, Kosten pro Verbindung etc.). Fragen zur Fertigung sollten im Rahmen eines weiteren Workshops in diesem Dialogfeld diskutiert werden. (Anmerkung: Der Workshop „Industrielle Fertigung im Holzbau“ findet im April 2016 statt.) Weiter stellt sich auch die Frage nach der architektonischen Wirkung (hatte im Rahmen des Workshops sehr wenig Gewicht), nach der Umsetzung auf der Baustelle und der Zusammenarbeit mit möglichen Marktplayern (Gibt es sie? Wie gross ist der Markt für die erarbeitete Lösung?). Parallel dazu sollen die Resultate sowohl wissenschaftlich als auch publikumswirksam kommuniziert werden. Daraus können sich Wechselwirkungen ergeben, an die man nicht gedacht hat.

30. November 2015