

Bauen mit Rohholz

Martin Trautz¹, Kevin Moreno Gata¹, Florian Spahn², Sven Klinkel²

¹Lehrstuhl für Tragkonstruktionen, RWTH-Aachen

²Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik, RWTH-Aachen

Zusammenfassung: Der traditionelle Holzbau basiert auf einem komplexen Vorbearbeitungs- und Logistikprozess, der mit einem hohen Bearbeitungsgrad der Halbzeuge und der Verwendung von fast ausschließlich Stammholz verbunden ist. Um die Effizienz der Holznutzung zu verbessern, muss über neue Ansätze zur Konstruktion und über neue Konstruktionsmethoden nachgedacht werden. Die Nutzung von Holz im nicht homogenisierten Zustand muss umfassend möglich gemacht werden und es ist eine größere Auswahl an Holz wie es in der Natur zu finden ist, und andere Holzarten, als die angestammten, einbezogen werden. Mit Hilfe von Image-Based-Modelling Verfahren, mit parametrischer Software, mit Hilfe von Festigkeitsansätzen für Querschnitte mit variabler Steifigkeit, mit Methoden des Reverse-Engineering und der Off-Knot-Bauweise können auch gering bearbeitete, natürliche Holzelemente, so genannte Rohholzelemente für Bau- und Tragkonstruktionen genutzt werden. Erste Ergebnisse zur Entwicklung der dazu notwendigen Techniken basieren auf mehrjähriger Forschung an der RWTH Aachen und einem laufenden DFG-Projekt.

Stichworte: Image-Based-Modelling, parametrische, Querschnitte mit variabler Steifigkeit, Reverse-Engineering, Off-Knot-Bauweise

1 Motivation

Seit der Mensch Holz als Baumaterial verwendet, unterzieht er es einem umfassenden Bearbeitungsprozess, um Bretter, Balken, Latten und Lamellen als Halbzeuge zu gewinnen bzw. als Grundlage für die Herstellung homogenisierten Holzes wie Brettschichtholz. Dabei wird ausschließlich Stammholz verwendet, mit einem Durchmesser – je nach Verarbeitungsmöglichkeiten des Sägewerkes - von 30cm und mehr. Neben dem bei dieser Produktionsweise entstehenden Holzverschnitt müssen Äste und Astgabeln wegen ihres geringen Querschnittes und ihrer Krümmungen entweder im Wald verbleiben oder untergeordneten Nutzungen wie Zerspanung zugeführt werden. Während Nadelholz einen relativ geringeren Volumenanteil an Ästen (ca. 30% bis 45%) aufweist, ist der Anteil an

Ästen bei Laubholz deutlich größer, nämlich über 50% bis ca.70%. So bleiben an zu Brettern und Balken verarbeitbarem Holz nur etwa 30%- ca. 40% übrig und der deutlich größere Rest bleibt ungenutzt oder wird zerspannt und zu anderen Holzwerkstoffen wie z.B. Platten verarbeitet. Abgesehen von der Tatsache, dass Holzwerkstoffe auf die großtechnische Nutzung von Leimen gestützt sind, die gleichbedeutend mit einer Vermischung mit synthetischen, u.U. sogar nicht biologisch abbaubaren Materialien ist, erfordert der hohe Verarbeitungsgrad von Holzhalbzeugen und holzbasierten Werkstoffen einen umfassenden Einsatz von Energie. Der steigende Trend Holz als Baumaterial in der Architektur zu verwenden, und damit verbunden, die ständig steigende Nachfrage nach Holz, erhöhen den Druck, die Nutzungseffizienz in der Holzwirtschaft bei der Holzverwertung zu steigern, um diesem Bedarf gerecht zu werden.

Weil der vorhandene Holzvorrat nur bedingt vergrößert werden kann, muss es darum gehen, den bestehenden Vorrat besser zu nutzen. Dazu müssen Kapazitäten von Holz wie das Astholz und andere gekrümmte Hölzer und Holz minderer Querschnitte genutzt werden. Dazu ist das Holz in seiner ursprünglichen, runden Form einzusetzen und ein vermindertes Verarbeitungsniveau anzustreben, z.B., so, dass nur noch die Flanken eines Rundholzes abgetragen und geglättet werden, damit sie als Kernholz im Rahmen einer Sandwichbauweise eingesetzt werden können. Holzgabelungen, die von deutlich größerer Festigkeit sind als vergleichbare, ingenieurmäßig verbundene Stabhölzer, sollten ebenso gezielt eingesetzt werden [1]. Hierzu ist zum einen eine völlig neue Herangehensweise bei der Konstruktion von Holzbauten vonnöten, die einerseits in ihrer Geometrie vorbestimmte Bauteile einbindet, um Krümmhölzer und Gabeln oder auch dünne Stammhölzer einsetzen zu können [2]. Zum anderen kann das Holz bei der Berechnung nicht mehr als homogenes Material angenommen werden und beim statischen Nachweis auch nicht mehr die nach klassischer technischer Biegelehre ermittelten Querschnittswerte eingesetzt werden, sondern es muss bezüglich der Festigkeit mit seiner natürlichen, polar strukturierten Beschaffenheit in die Analyse eingehen.

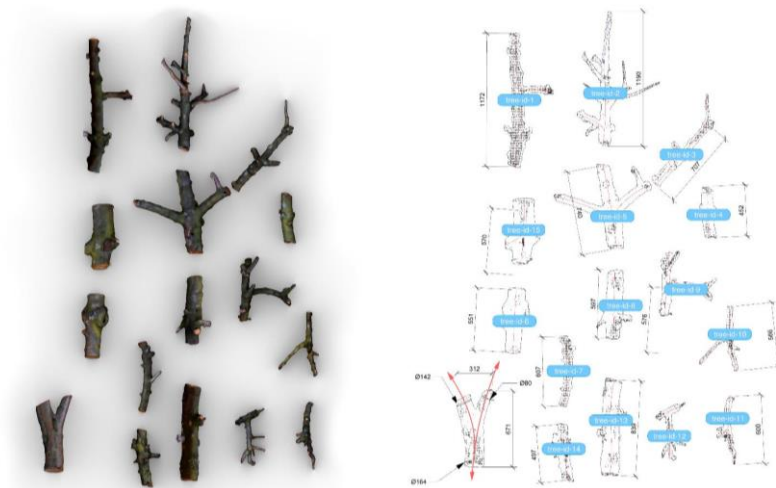


Abbildung 1: Reverse Engineering: Digitale Aufnahme und Rekonstruktion eines Baumes. Dies ermöglicht die Katalogisierung der gewachsenen Elemente des Baumes.

1.1 Stand der Technik

Neuartige digitale Anwendungen wie Photogrammetrie oder Laserscanning ermöglichen die Kombination natürlicher und digitaler Geometrien und die Abbildung von Baumteilen. Unbearbeitete Stämme und Äste verwendete [3]. Die Einbeziehung und Katalogisierung von Astgabeln, mit digitalen Standardisierungstechniken vereinfacht den Entwurfs- und Herstellungsprozess beim Bauen mit Rohhölzern [4]. Robotergestützte Fertigungsstrategien ermöglichen die Erforschung neuer Möglichkeiten zur Verbesserung des Entwurfs von Strukturen [5]. Bei anderen Designstudien wurden auch Baumgabeln [6] und Krummhölzer [7] bei der Erstellung netzartiger Schalen integriert. Darüber hinaus ermöglicht die Untersuchung des Wachstums von Bäumen, ihre Geometrie zu verstehen und durch gezielte Leitung während dessen geometrisch individuelle, konstruktive Elemente zu erzeugen [8]. Durch Vereinfachung der Baumgeometrie und der Querschnitts des Rundquerschnitts ermöglichen mechanische Wachstumssimulationen [9]. Neuere Untersuchungen an „grünem“ Eichenholz kleineren Durchmessers, mittels Materialcharakterisierung und Belastungstests sind erste Versuche die Tragfähigkeit innerhalb technischer Strukturen zu ermitteln. [10], [11].

1.2 Konstruieren mit Rohholz

Konstruieren mit Rohholz kann man als Technik des ‚Reverse Engineering‘ bezeichnen, siehe Abb. 1, denn anstatt die Bauteile einer Bau- oder Tragkonstruktion auf die geplanten geometrischen und konstruktiven Vorgaben auszurichten und abzulängen, wählt man in Teilen fertige Bauelemente, wie sie in der Natur gewachsen sind, aus einer möglichst großen Auswahl aus und passt sie an die entsprechende Stelle der Planung bzw. Geometrie einer Baukonstruktion oder eines Tragwerkes und der Querschnittszuordnung gemäß statischen Erfordernissen ein. Dabei kommt *Image-Based Modelling* zur geometrischen Beschreibung der einzusetzenden Holzbauteile zum Einsatz, deren Daten in einer nach bestimmten Kriterien strukturierten Datenbank (z.B. Topologie des Elementes, Krümmung(en), Querschnittsdurchmesser, Holzspezies, usw.) hinterlegt werden. Die Verarbeitung dieser in ihrer geometrischen und materiellen Beschaffenheit gegebenen Bauteile, im Hinblick auf die Umsetzung einer angestrebten Konstruktion oder einem Tragwerk erfolgt mit Hilfe parametrischer Software. Dabei wird auf die Elemente der Datenbank zurückgegriffen und diese in die zu planende Baukonstruktion oder Tragkonstruktion eingefügt. Zu den typischen Kenngrößen der Bauteile gehören ihre geometrischen Abmessungen wie Länge, Querschnittsdurchmesser, ggf. Abzweigdurchmesser und – Abzweigwinkel, Holzspezies und die daraus ermittelten statisch relevanten bzw. statischen Kennwerte wie die Lage der Schwerachse, Querschnittsflächen, Trägheitsmomente und Widerstandsmomente oder Querschnittsexzentrizitäten. Nicht sichtbare Rohholzteile wie z.B. als Kernhölzer einer Sandwichkonstruktion [1] können in Form gekrümmter oder gegabelter Rohholzteile entlang der Hauptspannungstrajektorien eingelegt werden, so dass sie auf diese Weise in konstruktivem Zusammenhang verwertbar werden, siehe Abb 2.

Je größer und vielfältiger der Inhalt der Datenbank ist, also je umfassender die Anzahl verschiedenster und verfügbarer Rohholzelemente ist, die via 3D-Scan vorerfasst werden, desto homogener können die daraus generierten Konstruktionen sein. Es bietet sich deshalb an, ganze Stämme mit Verzweigung festzuhalten, auch lebende Bäume, die erst bei Bedarf gefällt werden, um daraus die für eine bestimmte Konstruktion benötigte Stabkonfiguration realisieren zu können. Die Konstruktion mit Rohholz sieht also vor, sowohl älteres trockenes

Holz als auch kurz zuvor gefälltes und getrocknetes Holz einzubinden, genauso wie unterschiedliche Holzarten, um einen möglichst breites Spektrum an Rohholzteilen zur Verfügung zu haben. Dazu sind die Unterschiede der Festigkeitseigenschaften von totem, getrocknetem und lebendem Holz zu untersuchen, für Baumarten, die in großer Anzahl zur Verfügung stehen.

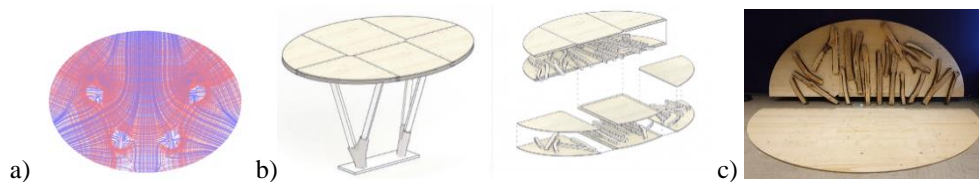


Abbildung 2: a) Hauptspannungstrajektorien. b) Aufbau einer Sandwichplatte mit Rohholzteilen als Kernhölzer. c) Ansicht des mit Sandwichplatten verschraubten Holzkerne.

2 Off-Knot-Bauweise und ebene Tragkonstruktionen aus Rohholz

Es ist geradezu ein Gebot der Effizienz, auch natürlich verzweigtes Holz und Astgabeln zu verwenden, denn man nutzt dabei bewusst die ihre Biegesteifigkeit. Anders als bei konventionellen Stabkonstruktionen werden dabei die Fügungsknoten weg von den Tragwerksknoten in Richtung des Stabes versetzt, was als ‚Off-Knot-Bauweise‘ [12] bezeichnet wird. Die Fügungsknoten können dann sowohl gelenkig als auch biegesteif durchgebildet werden, wobei letzteres besonders attraktiv sein kann, weil eine natürliche Astgabel eine sehr hohe Biegesteifigkeit mit sich bringt und so die Verformungen eines Tragwerkes unter Last deutlich verringert werden können (siehe Abb. 3). Solche Fügungen lassen sich als Formschlussverbindungen oder mittels Vollgewindeschrauben realisieren. Es werden einfachste Verbindungsmittel aus Stahl eingesetzt, die auch danach leicht trennbar und vollständig rezyklierbar sind. Bei Off-Knot-Konstruktionen ist die Umsetzung von biegesteifen Stößen im Vergleich zu konventionellen Fügungen ohne Versatz zu den Stab- oder Tragwerksknoten geometrisch einfacher zu realisieren, weil beide Seiten der Fügung für Verbindungsmittel zugänglich sind.



Abbildung 3: (Links) Beispiel eines biegesteifen Knotens in Form einer Astgabel mit ausgelösten Schnittgrößen. (Rechts): Biegesteifer Knoten durch Stahlring und Vollgewindeschrauben.

Rohholzkonstruktionselemente lassen sich durch Abtrag der Stabflanken mit minimalem Nachbearbeitungsaufwand zu ebenen Tragstrukturen umformen, so dass sie sich in konventionelle, orthogonale Bausysteme einbinden lassen. Die Mitte bzw. der Mittelpunkt des Rohholzquerschnitts dient als geometrischer Schwerpunkt des jeweiligen Elementes und gibt die Lage der Schwerachse an. Relativ zu dieser Achse kann dann auch der Materialtrag

an den Flanken erfolgen. Die Kombination von Holz von geringem Verarbeitungs- oder Nachbearbeitungsgrad mit traditionellen Plattenhalbzeugen ermöglicht den Einsatz von Rohholz auch in Verbindung mit der Holztafelbauweise und ähnlichen Systemen.

2.1 Rekonstruktion von gewachsenem Holz anhand von Bildern (*Image Based Modelling*)

Um die 3D gescannten Rohholzteile geometrisch umfassend zu umschreiben, müssen sie kalibriert werden. Das bedeutet, die nach der zuvor beschriebenen Methode ermittelten Systemachsen müssen mit der Volumenverteilung aus dem Scan in Übereinstimmung gebracht werden. So erhält man ein authentisches Abbild des Bauteils mit seinen kompletten räumlichen Ausdehnungen sowie seiner statisch wirksamen Raumachsen. Wegen ihres natürlichen Wachstums und der unregelmäßigen Verteilung der Biomasse an einem Rohholzelement einerseits und seiner späteren Einbindung in eine Konstruktion, die insgesamt eben und zweidimensional ist oder dreidimensional, mit zweidimensionalen Ebenen an den Verbindungsknoten, andererseits, müssen die dominierenden Raumachsen ermittelt werden. Damit lassen sich die Hauptebenen eines Rohholzbauteils bestimmen und damit die Ebenen, die meistens Symmetrieebenen entsprechen, mit denen es in ein Tragwerk eingefügt werden kann. Dieser Prozess lässt sich komplett am digitalen Modell durchführen. Man benutzt hierzu *Bounding Boxes* (Abb. 4), mit denen das minimale, umfassende Volumen eines betrachteten Rohholzbauteils bestimmt wird. Die so ermittelten Flächen des Volumens repräsentieren zumindest eine Symmetrieebene, entlang derer ermittelt werden kann, wie groß die geometrischen Abweichungen der einzelnen Volumenpunkte sind. So lässt sich entscheiden, ob und inwieweit das Bauteil geometrisch geeignet für den Einsatz in einer tragenden Konstruktion ist. Dieser Prozess lässt entsprechend im CAD komplett automatisieren, so dass die geometrische Bauteilerfassung entsprechend zügig vonstattengehen kann.

Im Weiteren wird – wieder automatisiert - das räumliche Netz in ein NURBS Volumen überführt, das alle ermittelten geometrischen Daten beinhaltet, insbesondere die Schwerachsen, die auch Hauptwachstumslinien (in rot) (Abb. 5.). In dieser Form, als NURBS Volumen, werden die Bauteile in einer Datenbank hinterlegt, die sämtliche geometrischen, festigkeitsrelevanten und ggf. andere Informationen abrufbar vorhält. Sämtliche NURBS Volumina lassen sich nach Vorgabe der Konstruktionslinien addieren bzw. verschneiden, so dass sich aus ihnen die gewünschte Tragstruktur zusammensetzen lässt. Das NURBS Modell steht natürlich auch für die numerische Simulation zur Verfügung, um die statischen Nachweise zu führen.

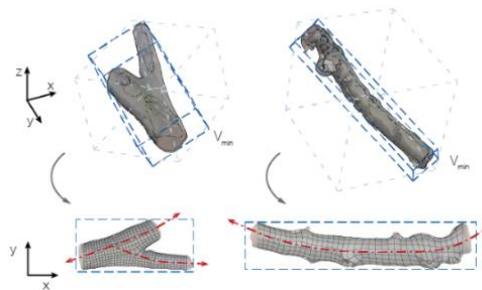


Abbildung 4: Automatisierung von *Bounding Boxes* mit minimalem Volumen und 2D-Neuausrichtung.

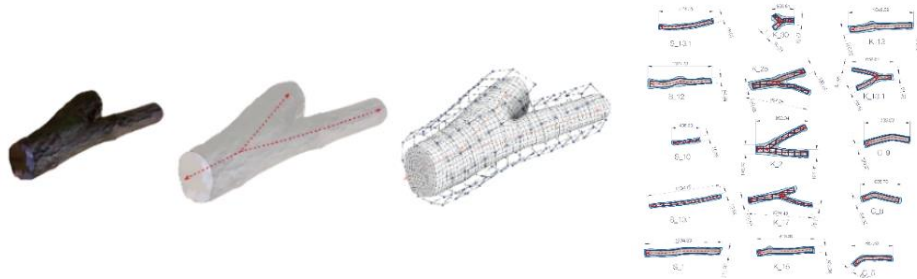


Abbildung 5:(Links) Bildbasierte 3D-Modellierungsmethode, vom 3D-Netz zu NURBS und Wachstumstrajektorien. (Rechts)Analyse der Elemente auf der Grundlage der bildbasierten Methodik.

2.2 Statische Kennwerte polarer Holzquerschnitte.

Rohholz ist polar um den Schwerpunkt strukturiert und variiert entlang des Radius hinsichtlich der Dichte, Festigkeit und Steifigkeit [13]. Ringförmige Zwischenschichten beeinflussen das Scherabtragverhalten zwischen diesen Schichten. Auch dies entspricht den Anwendungsvoraussetzungen der klassischen Biegetheorie nicht und bedarf einer eigenen mechanischen Beschreibung. Im Gegensatz zu klassischen Ingenieurbaustoffen wie Stahl und Beton, variiert das Elastizitätsmodul von Rundholz über den Querschnitt. Zur Abbildung der Festigkeitseigenschaften eines polaren Holzquerschnittes kann man sich ein Ersatzquerschnitt vorstellen, der die Ringschichten des Holzes abbildet, die unterschiedlichen Steifigkeiten entlang des Radius zugeordnet sind.

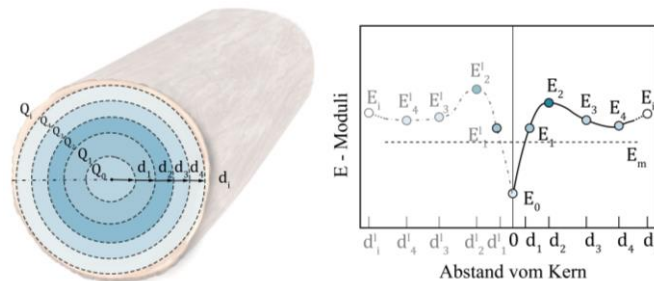


Abbildung 6: Symmetrisierte Variation der E-Moduli über den Querschnitt nach [13].

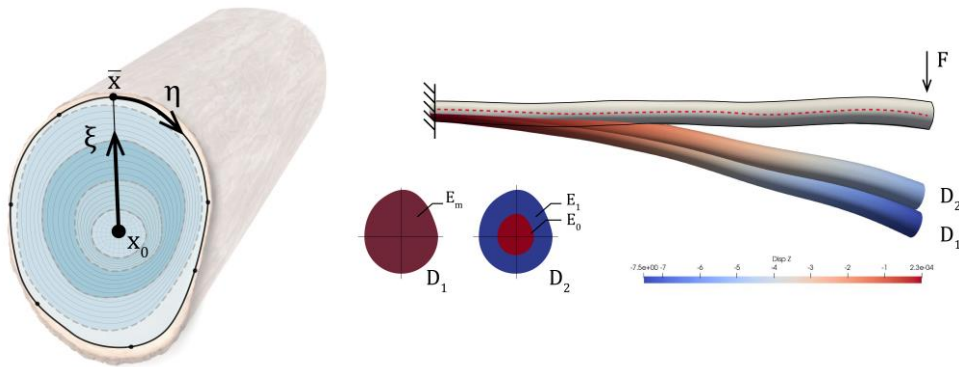
Diese veränderliche, nicht konstante, Elastizitätsmodulverteilung des Balkens hat Einfluss auf das Biegeverhalten und damit die Statik. Wird diese Variation der Materialparameter missachtet, ist eine Fehleinschätzung die Folge, woraus die Querschnittseigenschaften (Fläche, Flächenträgheitsmomente etc.) zu steif oder zu weich berechnet werden (1) (2).

$$A_0 \dots A_i \quad A_{ges} = A_{ges} \frac{E_0}{E_{ges}} + A_{ges} \frac{E_1}{E_{ges}} + \dots + A_{ges} \frac{E_i}{E_{ges}} = \sum_{n=0}^{n=i} A_{ges} \frac{E_i}{E_{ges}} \quad (1)$$

$$J_0 \dots J_i \quad J_{ges} = J_{ges} \frac{E_0}{E_{ges}} + J_{ges} \frac{E_1}{E_{ges}} + \dots + J_{ges} \frac{E_i}{E_{ges}} = \sum_{n=0}^{n=i} J_{ges} \frac{E_i}{E_{ges}} \quad (2)$$

Zur genauen Berechnung dient ein isogeometrisches Modell, in dem die Geometrie durch B-Splines und NURBS als Ansatzfunktionen zur Numerischen Lösung eingesetzt werden (3).

Auf ihrer Basis werden die über den Querschnittsradius unterschiedlichen Dichten, Steifigkeiten und Schubsteifigkeiten des natürlich gewachsenen Holzes beschrieben. Schon die Verwendung von wenigen unterschiedlichen E-Moduli über die Querschnittsfläche, führt zu genaueren Ergebnissen bei der Verformungsberechnung.



$$x = x_0 + \xi (\bar{x} - x_0) \quad (3) \quad E_0 < E_m < E_1 \quad (4)$$

Abbildung 7: (Links) Polarer Skalierungsansatz. (Rechts) Vergleich Ast unter Biegung bei Berechnung mit konstanter mittlerer E-Modul Verteilung, mit Berechnung mit verschiedener E-Modul Bereiche.

Um die polare Materialstruktur von Holz einfacher beschreiben zu können, wird eine Methode auf Basis der *Scaled Boundary Isogeometric Analysis* [14] gewählt. Bei dieser Methode entsprechen die Elementkoordinatenrichtungen den lokalen Materialrichtungen im Holz [15], [16]. Für eine realistische numerische Lösung ist eine genaue Beschreibung der Geometrie [17], sowie die genaue Verteilung der Materialparameter im Volumen relevant (4).

3 Zusammenfassung und Ausblick

Der Umgang mit Rohholz in der Bautechnik erweitert die Möglichkeiten des Einsatzes von Holz, auch hinsichtlich bisher nicht verwendeten Holzes wie unterwüchsiges Stammholz und Krummhölzern aller Art. Nicht für jeden konstruktiven Einsatz ist homogenisiertes und hochgradig bearbeitetes Holz notwendig. Rohholz lässt sich kombinieren mit bearbeiteten klassischen Holzhalbzeugen wie Brettern, Balken oder auch Plattenwerkstoffen und kann auch innerhalb klassischer Holzbauweisen eingesetzt werden. Für Rohholzbauteile lassen sich Holzspezies einsetzen, die bisher nicht verwendet wurden, z.B. weil sie für die Verarbeitung weniger geeignet sind (Drehwuchs). In Verbindung mit Festigkeitswerten für natürlich polare strukturierte Holzquerschnitte ist ein statischer Nachweis für Rohholz möglich, was damit einem deutlich erweiterten Einsatz auch bei Tragkonstruktionen entgegensteht. Durch die vorliegenden Untersuchungen und Entwicklungen werden

Voraussetzungen für eine sehr viel umfassendere Nutzung von Holz für Bau- und Tragkonstruktionen als bisher geschaffen. Dabei wird der Verarbeitungsprozess wesentlich vereinfacht, die Berechenbarkeit von Holz in seiner eigentlichen Form als kreisförmiger Querschnitt ist möglich, so dass Holz zusehends gemäß seiner natürlichen Beschaffenheit eingesetzt werden kann und so auch danach, am Ende der Nutzung ohne Einschränkungen wieder in den natürlichen Stoffkreislauf zurückgeführt werden kann.

DFG-Projekt zum Thema ‚Rohholz‘: RWTH Aachen, Lehrstuhl Tragkonstruktionen, Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik der RWTH Aachen sowie dem Institut für Bio und Geowissenschaften/Pflanzenwissenschaften (IBG-2) des Forschungszentrums Jülich. Projekt-ID: 512769030.

Literatur

- [1] K. Moreno Gata, F. Amtsberg, M. Trautz, and A. Menges, “reGrowth — Tragkonstruktionen aus ungenutzten Holzabschnitten,” Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2023. Accessed: Nov. 13, 2023. [Online]. Available: <https://publications.rwth-aachen.de/record/973205>
- [2] K. Moreno Gata, A. Seiter, D. Grizmann, and M. Trautz, “Development of construction methods with naturally grown timber and bending-resistant joints,” in Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Oslo, 2023.
- [3] M. Self, E. Verduyck, A. Menges, B. Sheil, R. Glynn, and M. Skavara, “Infinite variations, radical strategies,” in Fabricate 2017, UCL Press, 2017, pp. 30–35. doi: 10.2307/j.ctt1n7qkg7.8.
- [4] F. Amtsberg, Y. Huang, D. Marshall, K. Moreno Gata, and C. Mueller, Structural Up-cycling: Matching Digital and Natural Geometry. Paris: École des Ponts ParisTech & Université Gustave Eiffel, Presses des Ponts, 2021.
- [5] F. Amtsberg, K. Moreno Gata, Y. Huang, C. Mueller, and D. Marshall, “DI-Terial – Development of Sensory-Informed Design-to-Fabrication Processes for the Efficient Use and Robotic Production of Discarded One-Off Hardwood Elements,” presented at the 12. World Conference on Timber Engineering, Curran Associates, Inc., 2021. Accessed: Nov. 14, 2023. [Online]. Available: <https://publications.rwth-aachen.de/record/825086>
- [6] P. V. Buelow, O. O. Torghabehi, S. Mankouche, and K. Vliet, “Combining parametric form generation and design exploration to produce a wooden reticulated shell using natural tree crotches,” 2018.
- [7] N. M. Larsen and A. K. Aagaard, “Robotic processing of crooked sawlogs for use in architectural construction,” Constr. Robot., vol. 4, no. 1, pp. 75–83, Jun. 2020, doi: 10.1007/s41693-020-00028-7.
- [8] K. Moreno Gata, D. Grizmann, and M. Trautz, “Guiding the Tree Growth for Timber Structures Design,” presented at the World Conference on Timber Engineering, WCTE, Santiago de Chile, Chile, 12.08 2021.

- [9] K. Moreno Gata, J. Musto, and M. Trautz, "Growing Construction Components - Design and simulation strategy for self-formation following tree growth," in Werner, L and Koering, D (eds.), *Anthropologic: Architecture and Fabrication in the cognitive age - Proceedings of the 38th eCAADe Conference - Volume 2*, TU Berlin, Berlin, Germany, 16-18 September 2020, pp. 51-59, CUMINCAD, 2020. Accessed: Feb. 10, 2021. [Online]. Available: http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2020_312
- [10] N. Hofmann, F. Brüchert, U. H. Sauter, K.-U. Schober, B. Hörnel-Metzger, and M. L. Müller, "GREEN OAK BUILDING WITH HIGH-TECH METHODS, PART 1: CHARACTERISATION OF THE RAW MATERIAL," in *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)*, Oslo, Norway: World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), 2023, pp. 711–716. doi: 10.52202/069179-0097.
- [11] K.-U. Schober, B. Hörnel-Metzger, M. L. Müller, N. Hofmann, F. Brüchert, and U. H. Sauter, "GREEN OAK BUILDING WITH HIGH-TECH METHODS, PART 2: LOG BENDING TESTS FOR DETERMINATION OF STRENGTH AND STIFFNESS," in *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)*, Oslo, Norway: World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), 2023, pp. 119–125. doi: 10.52202/069179-0016.
- [12] M. Trautz and A. Seiter, "Der Luisenturm auf dem Atzelberg," *Stahlbau*, vol. 92, no. 1, pp. 49–53, 2023, doi: 10.1002/stab.202200074.
- [13] M. Matsuo-Ueda et al., "Comprehensive study of distributions of residual stress and Young's modulus in large-diameter sugi (*Cryptomeria japonica*) log," *Wood Sci. Technol.*, vol. 56, no. 2, pp. 573–588, Mar. 2022, doi: 10.1007/s00226-022-01360-7.
- [14] M. Chasapi, L. Mester, B. Simeon, and S. Klinkel, "Isogeometric analysis of 3D solids in boundary representation for problems in nonlinear solid mechanics and structural dynamics," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 123, no. 5, pp. 1228–1252, 2022, doi: 10.1002/nme.6893.
- [15] F. Spahn, K. M. Gata, M. Trautz, and S. Klinkel, "Generalised Scaled Boundary Isogeometric Analysis - A Method for Structural Computation of Roundwood Structures (submitted, in review process)".
- [16] F. Spahn, K. Moreno Gata, M. Trautz, and S. Klinkel, "Image-based Modelling of Wooden Structures for Structural Computation," in *3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods*, Dresden, Sep. 2023.
- [17] K. Moreno Gata, F. Spahn, S. Klinkel, and M. Trautz, "Geometrical analysis of naturally grown timber for the design of load-bearing structures (submitted)." Jan. 05, 2024.