

BBSR-
Online-Publikation
03/2023

3DWoodWind

Robotische Wickelverfahren für materialeffiziente Leichtbauteile aus Furnierholz

von

Prof. Philipp Eversmann
Andreas Göbert
Julian Ochs
Ole Weyhe

3DWoodWind

Robotische Wickelverfahren für materialeffiziente
Leichtbauteile aus Furnierholz

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.24

Projektlaufzeit: 02.2021 bis 12.2022

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Arnd Rose
arnd.rose@bbr.bund.de

Autoren

Universität Kassel
Fachbereich „Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung“
Fachgebiet „Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren“
Prof. Philipp Eversmann (Projektleitung)
eversmann@asl.uni-kassel.de

Andreas Göbert, M. Sc.
goebert@asl.uni-kassel.de

Julian Ochs, M. Sc.
julian.ochs@uni-kassel.de

Ole Weyhe, B. Sc.

Redaktion

Universität Kassel
Andreas Göbert

Stand

Dezember 2022

Gestaltung

Universität Kassel
Andreas Göbert

Bildnachweis

Titelbild: Mona Schmidt
Mona Schmidt: S. 51, 52; alle weiteren Abbildungen mit Ausnahme der Logos stammen von den Autoren

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Eversmann, Philipp; Göbert, Andreas; Ochs, Julian; Weyhe, Ole, 2023: 3DWoodWind: Robotische Wickelverfahren für materialeffiziente Leichtbauteile aus Furnierholz. BBSR-Online-Publikation 03/2023, Bonn.

INHALT

KURZFASSUNG	5
ABSTRACT	7
1 EINLEITUNG	9
1.1 Zusammenfassung und Problemstellung	9
1.2 Fragestellung und Methodik	9
1.3 Ziele	10
1.4 Prozesserläuterung	11
2 MATERIALSYSTEM	12
2.1 Furnierholz	12
2.2 Klebstoffsystem	14
2.3 Untersuchungen des Materialsystems	16
3 WICKELPROZESS	19
3.1 Generierung von Wickellinien	19
3.2 Wickelwinkel	19
3.3 Lagenaufbau	19
3.4 Freiformgeometrien	21
4 ROBOTISCHE FABRIKATION	22
4.1 Aufbau der Roboteranlage	22
4.2 Werkzeugpfad	23
4.3 Fügung	25
5 BAUTEILGEOMETRIE	28
5.1 Profile & Querschnitte	28
5.2 Schalungssystem	29
5.3 Fertigungsparameter	32
6 GROßMAßSTÄBLICHE PROZESSVERSUCHE	35
6.1 Aufbau der Roboteranlage	35
6.2 Schalungssystem	36
6.3 Bauteilgeometrie, Faserverlauf & Lagenaufbau	39
6.4 Klebstoffapplikation und -dosierung	43
6.5 Prototyping	50
7 ARCHITEKTONISCHE ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN	54
7.1 Geometrische Möglichkeiten	54
7.2 Bauteilanwendungen	54
7.3 Modulare Systeme	55
7.4 Individualisierungsmöglichkeiten	56
7.5 Verbindungstechniken	56
7.6 Realisierte Anwendungen	57
8 AUSWERTUNG / FAZIT	62
8.1 Prozessparameter und Abhängigkeiten	62
8.2 Prüfverfahren	63
8.3 Ökobilanzierung	64
8.4 Resümee & Ausblick	67
9 ANHANG	69
9.1 Danksagung	69
9.2 Literaturnachweis	70
9.3 Abbildungsverzeichnis	70



KURZFASSUNG

Problemstellung

Additive Herstellungsprozesse sind für die Bauindustrie sehr vielversprechende und ressourceneffiziente Bauprozesse, die eine Herstellung von Bauteilen direkt aus der 3D-Planung möglich machen. Für den Beton- sowie den Stahlbau werden aktuell eine Vielzahl von additiven Verfahren entwickelt, die bereits in ersten Pilotprojekten ihre Anwendung finden.

Im Holzbau finden additive Verfahren trotz der sehr hohen Digitalisierung und technischen Entwicklung noch kaum Anwendung. Aktuell bekannte Verfahren verwenden Holz meist in Verbund mit Polymeren in pulverisierter Form, wodurch die inhärenten Materialeigenschaften allerdings verloren gehen. Mit Endlosbändern aus Furnierholzstreifen, in denen die für die strukturellen Eigenschaften des Holzes verantwortliche Mikrostruktur erhalten bleibt, ist es möglich, Hohlbauteile über dreidimensionale Wickelprozesse mit minimalen Materialaufwand und angepassten strukturellen Eigenschaften zu entwickeln.

In der Baubranche sind zunehmend ressourceneffiziente Bauweisen gefragt. Additive Fertigungsprozesse ermöglichen, das Material nur dort aufzutragen, wo es tatsächlich notwendig ist. Diese Prozesse sind im Holzbau noch kaum erforscht.

Das von Zukunft Bau geförderte Forschungsvorhaben 3DWoodWind untersucht additive Auftragsmethoden von Furnierholz-Endlosbändern, um neuartige Leichtbaukonstruktionen zu ermöglichen. Diese dreidimensionalen Wickelprozesse haben ein hohes Innovationspotenzial, da Hohlbauteile aus Furnierholz mit angepassten strukturellen Eigenschaften entwickelt werden können. Hierzu wird die natürliche Faserrichtung des Holzes ausgenutzt und kann strukturell ausgerichtet werden, woraus nicht nur hoch performante Bauteile resultieren, sondern gleichzeitig auch äußerst materialeffizient und nachhaltig mit der aktuell immer knapper werdenden Ressource Holz umgegangen wird.

Untersuchungsmethoden

Durch experimentelle Voruntersuchungen an kleinmaßstäblichen Probekörpern wurden die Bauteileigenschaften des Materialsystems überprüft und optimiert. Parallel wurden computerbasierte Entwurfsmethoden für die Filamentauslegung und robotergestützte Fertigungsverfahren über digitale Prozesssimulation entwickelt und Prozessparameter über physische Versuche definiert.

Simultan zu den Untersuchungen der Fertigungstechnik wurden Fügungskonzepte und geeignete Schalungssysteme entwickelt und prototypisch umgesetzt. Durch umfangreiche Untersuchungen zur Bauteilgeometrie und Applikationstechnik konnten Erkenntnisse zu geometrischen Möglichkeiten und Grenzen der Herstellungstechnik, relevanten Bauteilanwendungen, Individualisierungsmöglichkeiten und Verbindung der gewickelten Bauteile gewonnen werden. Durch die Fabrikation von vollmaßstäblichen Prototypen konnte die Herstellungstechnik evaluiert und optimiert werden. Mithilfe eines Toleranzabgleichs konnten darüber hinaus Aussagen zur Präzision der Fertigungstechnologie erzielt werden.

Ergebnisse

Das Forschungsprojekt 3DWoodWind hat eine neue Generation von additiven Technologien für den Holzbau entwickelt. Das modulare Bausystem wurde mit einem dreidimensionalen robotergestützten Wickelverfahren für materialeffiziente hohle Leichtbauteile realisiert. Eine intelligente Kombination und Gestaltung von modularen Komponenten zu mehrstöckigen Strukturen könnten in Zukunft Massivholzplatten und -träger sowie Betonplatten und Stahlprofile ersetzen.

Mit dem Einsatz von Holzfurnier stellt die entwickelte Herstellungstechnik eine Alternative zu synthetischen Fasern wie Kohlenstoff- oder Glasfasern dar, die üblicherweise beim Wickeln verwendet werden, sowie zu den im Bauwesen bekannten Massivholzprodukten.



Hierdurch weist die Herstellungstechnik für materialeffiziente Leichtbauteile aus Furnierholz ein hohes Potenzial im Hinblick auf Ressourcenschonung auf. Innerhalb des Forschungsprojekts wurden insbesondere der Umgang mit Ressourcen und die Entwicklung neuer Bauprozesse sowie die Etablierung klima- und umweltfreundlicher Bauweisen adressiert. Mit der Entwicklung eines modularen Bausystems, das auf großflächige Anwendungen in mehrgeschossigen Strukturen abzielt, wurden innerhalb des Forschungsprojekts neue Verfahren und Techniken für eine zukunftsweisende und nachhaltige Entwicklung demonstriert.

Weiterer Forschungsbedarf liegt insbesondere in der Weiterentwicklung der computerbasierten Entwurfsmethoden und einer ingenieurbautechnischen Untersuchung der Bauteile, um optimierte Geometrien mit angepassten strukturellen Eigenschaften zu erzeugen. Darüber hinaus kann in Zukunft durch die Integration alternativer, biobasierter Klebstoffsysteme der ökologische Fußabdruck weiter verbessert werden.



ABSTRACT

Project tasks

Additive manufacturing processes are very promising and resource-efficient construction processes for the construction industry, which make it possible to manufacture components directly from 3D planning. A variety of additive processes are currently being developed for concrete and steel construction and are already being used in initial pilot projects.

Despite the very high level of digitalization and technical development, additive processes are still hardly used in timber construction. Currently known processes use wood in combination with polymers in pulverized form, whereby the inherent material properties are largely lost. Three-dimensional winding processes can be used to develop hollow components from veneered wood with minimal material input and adapted structural properties.

Resource-efficient construction methods are increasingly in demand in the construction industry. Additive manufacturing processes allow material to be applied only where it is actually needed. These processes have hardly been researched yet in wood construction.

The 3DWoodWind research project, funded by Zukunft Bau, is investigating additive application methods of continuous wood strips to enable new types of lightweight construction. These three-dimensional winding processes have a high innovation potential, as hollow components made of veneer wood with adapted structural properties can be developed. For this purpose, the natural fiber direction of the wood is exploited and structurally optimized, resulting not only in high-performance components, but also in extremely material-efficient and sustainable use of the currently increasingly scarce resource wood.

Research methods

The component properties of the material system were tested and optimized by means of preliminary experimental investigations on small-scale test specimens. In parallel, computational design methods for filament layout and robotic manufacturing processes were developed via digital process simulation, and process parameters were defined via physical tests.

Simultaneously to the investigations of the manufacturing technology, joining concepts and suitable formwork systems were developed and prototypically implemented. Extensive investigations into component geometry and application technology have provided insights into the geometric possibilities and limitations of the manufacturing technology, relevant component applications, customization possibilities and joining of the wound structures. By fabricating full-scale prototypes, the manufacturing technology could be evaluated and optimized. With the aid of a tolerance comparison, it was also possible to obtain information on the precision of the manufacturing technology.

Results

The 3DWoodWind research project has developed a new generation of additive technologies for wood construction. The modular building system was realized using a three-dimensional robotic winding process for material-efficient hollow lightweight components. Intelligent combination and design of modular components into multi-story structures could replace solid wood panels and beams as well as concrete panels and steel profiles in the future.

With the use of wood veneer, the developed manufacturing technology represents an alternative to synthetic fibers such as carbon or glass fibers, which are commonly used in winding, as well as to the solid wood products



known in the construction industry. As a result, the manufacturing technology for material-efficient lightweight components made of wood veneer has a high potential in terms of saving resources. Within the research project, particular attention was paid to the handling of resources and the development of new construction processes as well as the establishment of climate- and environmentally-friendly construction methods. With the development of a modular building system, which aims at large-scale applications in multi-storey structures, new pro-

cesses and techniques for a future-oriented and sustainable development were demonstrated within the research project.

There is a particular need for further research into the development of computational design methods and an engineering investigation of the components in order to generate optimized geometries with adapted structural properties. In addition, the ecological footprint can be further improved in the future by integrating alternative, bio-based adhesive systems.



1 EINLEITUNG

1.1 Zusammenfassung und Problemstellung

Additive Herstellungsprozesse sind für die Bauindustrie sehr vielversprechende und ressourceneffiziente Bauprozesse, die eine Herstellung von Bauteilen direkt aus der 3D-Planung möglich machen. Für den Beton- sowie den Stahlbau werden aktuell eine Vielzahl von additiven Verfahren entwickelt, die bereits in ersten Pilotprojekten ihre Anwendung finden. Im Holzbau finden additive Verfahren trotz der sehr hohen Digitalisierung und technischen Entwicklung noch kaum Anwendung. Aktuell bekannte Verfahren verwenden Holz in Verbund mit Polymeren in pulverisierter Form, wodurch die inhärenten Materialeigenschaften allerdings weitestgehend verloren gehen. Durch dreidimensionale Wickelprozesse können Hohlbauteile aus Furnierholz mit minimalen Materialaufwand und angepassten strukturellen Eigenschaften entwickelt werden.

In der Baubranche sind zunehmend ressourceneffiziente Bauweisen gefragt. Additive Fertigungsprozesse ermöglichen, das Material nur dort aufzutragen, wo es tatsächlich notwendig ist. Diese Prozesse sind im Holzbau noch kaum erforscht. Durch additives Auftragen von Furnierholzendlosbändern sollen neuartige materialeffiziente Leichtbaukonstruktionen ermöglicht werden. Dies geschieht in einem robotischen Bauprozess mit einem geeigneten Material- und Klebstoffsystem. Es wurden insbesondere Hohlprofil-Bauteile untersucht.

1.2 Fragestellung und Methodik

Folgende Forschungsfragen sollten beantwortet werden:
Was ist ein geeignetes Materialsystem aus Furnier/ Holzart und Klebstoff?

Welche Klebstoffe sind gleichzeitig automatisierbar, strukturell hoch performant und ökologisch sinnvoll?

Welche robotischen Werkzeuge sind notwendig und wie können die Prozessparameter der robotische Fertigung digital simuliert und optimiert werden?

Wie kann die die Prozesstechnik großmaßstäblich skaliert werden?

Welche Präzision und Oberflächenqualität sind erreichbar? Welche Bauteilformen eignen sich und was sind die Möglichkeiten und Grenzen dieser Herstellungstechnik?

Die entstehenden Fragestellungen wurden über experimentelle Versuchsreihen, digitale Prozesssimulation und Analyseverfahren erarbeitet. Was ist ein geeignetes Materialsystem im Bezug zur automatisierten Prozesstechnik, und was ergibt sich für eine resultierende Oberflächenqualität, Skalierbarkeit und Bauteilpräzision? Ist das Verfahren wirtschaftlich und ökologisch in einem industriellen Verfahren umsetzbar?

Das erste Arbeitspaket diente der Grundlagenforschung und war auf experimentelle Untersuchungen des Materialsystems ausgelegt, um in einem evolutionären Prozess aus Versuchsproben, Messungen und Belastungsproben optimierte Ergebnisse zu erlangen. Experimente wurden dokumentiert, ausgewertet und in Bezug zueinander gesetzt.

Im Verlauf der folgenden Arbeitspakete wurde die Auftrags- und Prozesstechnik über die Entwicklung von robotischen Werkzeugen entwickelt. Dabei wurden Werkzeugbestandteile über FDM 3D Druck prototypisch hergestellt. Über eine Reihe an kleinmaßstäblichen Prozessversuchen wurden die robotischen Bewegungen über digitale Prozesssimulation entwickelt, und die Prozessparameter über physische Versuche definiert. Diese konnten dann über Analyse des Schichtenzusammenhaltes, Genauigkeit des Klebstoffauftrages und der Präzision der entstehenden Bauteile in einem iterativen Prozess optimiert werden.

Die Entwicklung, Realisierung und Analyse von drei Demonstratoren im vierten Arbeitspaket sollten die erarbeiteten Ergebnisse überprüfen und im 1:1 Maßstab darstellen. Das Gesamtverfahren und die ermittelten Kennwerte wurden hinsichtlich ihrer Ökobilanz bewertet und in Bezug zu wirtschaftlichen Aspekten wie Skalierbarkeit, Maschineneinsatz, Arbeits- und Zeitaufwand gesetzt.

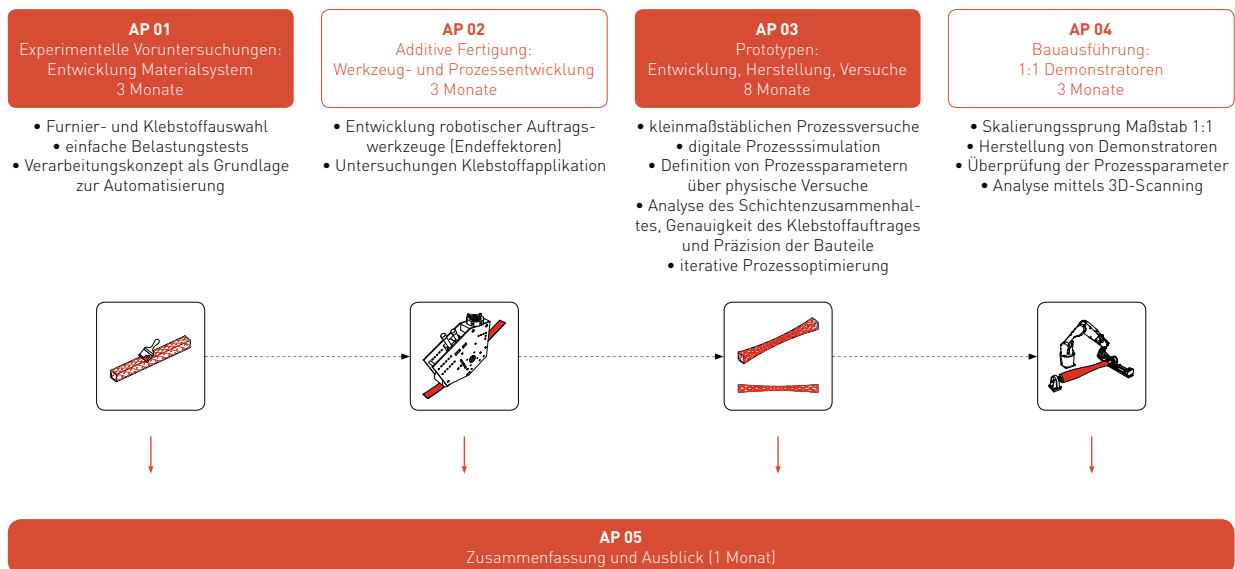


Abb. 1 Arbeitspakete

1.3 Ziele

Ziel des Projekts ist ein neuer Ansatz im Holzbau, statt den aktuell weit verbreiteten Massivbauweisen materialeffiziente Leichtbauteile herzustellen. Dazu wurde ein additives Fertigungssystem entwickelt, das einzelne dünne Furnierschichten ähnlich wie im 3D-Druck nach digitaler Modellierung auftragen kann. Bei Abschluss sollte dargestellt werden, wie diese Herstellung unter Laborbedingungen im 1:1 Maßstab möglich wäre, was Grenzen und Möglichkeiten dieser Technologie sind, und wie viel Material potenziell über diese Technik eingespart werden könnte. Spezifisch sollte demonstriert werden, welche Anwendungen und Formen unter welcher messbaren geometrischen Präzision und Oberflächenqualität möglich sind, und wie sich der Verbund der einzelnen Schichten verhält. Weiterhin sollten der Lebenszyklus und die Umweltverträglichkeit der entstehenden Verbundbauteile bewertet werden.



1.4 Prozesserläuterung

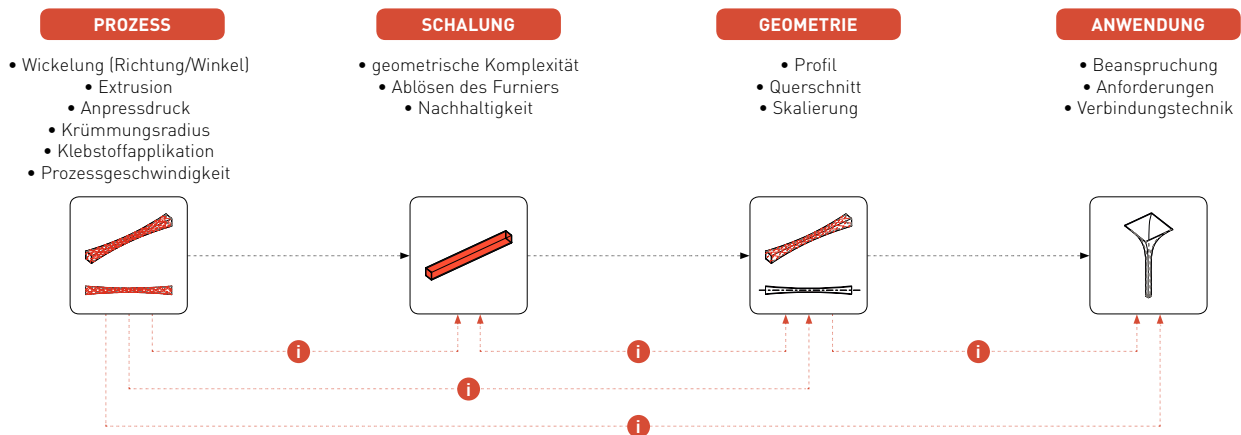


Abb. 2 Prozessdiagramm

Folgend ein kurzer Überblick über die wichtigsten Prozessparameter, die innerhalb des Projekts untersucht wurden und der jeweiligen Einflussfaktoren, welche sich untereinander bedingen und im Prozess aufeinander abgestimmt und rückgekoppelt wurden (Abb. 2):

- 1. Prozessentwicklung:**
 Die Prozessentwicklung beschäftigt sich mit relevanten Forschungsfragen zur Generierung von Wickellinien, der Extrusion des Holzfurniers, dem benötigten Anpressdruck zur Verklebung der einzelnen Furnierlagen, sowie Untersuchungen zum Krümmungsradius, Klebstoffapplikation und Prozessgeschwindigkeit.
- 2. Schalungssystem:**
 Die Frage nach einem geeigneten Schalungssystem, auf der das Bauteil gewickelt werden kann, beinhaltet Lösungen zur Komplexität der Bauteilgeometrie, dem Ablösen bzw. Ausschalen des gewickelten Furniers sowie zur Wiederverwendbarkeit der Schalung und damit verbunden zur Nachhaltigkeit des Schalungssystems.
- 3. Bauteilgeometrie:**
 Die Bauteilgeometrie selbst setzt sich zusammen aus Profil und Querschnitt und wird innerhalb der Forschungsarbeiten hinsichtlich der Skalierbarkeit näher betrachtet.
- 4. Anwendungsmöglichkeiten:**
 Bei den Anwendungsmöglichkeiten wurden Einflussfaktoren zur jeweiligen Beanspruchungsart, bauteilrelevanten Anforderungen und Fragen zur Verbindungstechnik betrachtet.



2 MATERIALSYSTEM

2.1 Furnierholz



Abb. 3 Rolle mit 24mm breitem Holzfurnier (Buche)

Als Filament für das Wickelverfahren wurden folgende Weich- und Harthölzer betrachtet, die sich zu Endlos-Rollen verarbeiten lassen: Fichte, Tanne, Ahorn, Buche und Eiche. Aufgrund der hohen Festigkeitseigenschaften und der bereits vorhandenen Integration im strukturellen Holzbau wurde Furnierholz aus Buche als Basis für das zugrundeliegende Materialsystem ausgewählt.

Das eingesetzte Holzfurnier wird aus dünnen Furnierstreifen hergestellt, welche aus Reststücken von größeren Bahnen für Möbeloberflächen bestehen. Die dünnen, kurzen Streifen können dann mithilfe einer Keilzinkenverbindung zu Endlos-Rollen zusammengefügt werden (Abb. 6).

Bei kleinmaßstäblichen Untersuchungen wurde eine Breite von 24mm und – je nach Krümmungsradius der Bauteilgeometrie – eine Materialstärke von 0,3 - 0,5 mm eingesetzt. In Abhängigkeit der zulässigen Biegeradien der Furniere wird die entsprechende Furnierdicke ausgewählt. Somit lässt sich eine Faltenbildung bzw. Stauchung des Furniers vermeiden, sodass die natürliche Holzstruktur intakt bleibt.

Der Mindestbiegeradius kann mithilfe einer einseitigen Vlieskaschierung (z.B. Cellulosevlies) als Verstärkungslage weiterhin verringert werden (Abb. 5). Insbesondere sehr dünne Furniere bekommen durch den Einsatz eines Vlies eine zusätzliche Stabilisierung und werden somit biegsamer, was das Anwendungsfeld für Geometrien mit geringen Krümmungsradien erhöht.



Abb. 4 Oberseite des Holzfurniers



Abb. 5 Unterseite des Holzfurniers mit Vlieskaschierung



Abb. 6 Detailaufnahme Keilzinkenverbindung zweier Furnierstreifen

Aufgrund der natürlichen Eigenschaften von Holz neigt das Material nach dem Umformen zur Rückverformung (Spring Back), was zu Spannungen im Materialsystem und nachträglichen Bauteilverformungen führen kann. Insbesondere bei sehr geringen Krümmungsradien sind daher sehr geringe Materialstärken notwendig – oder der Einsatz eines Klebstoffsystems, welches bereits während des Umformprozesses (temporär) aushärtet und die Rückverformung des Furniers verhindert. Um die Klebstoffmenge des Verbundmaterials so gering wie möglich zu halten, ist sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht ein möglichst dickes Furnier zu wählen. Aufgrund von herstellungsbedingten Begebenheiten müssen Furniere mit einer Materialstärke unter 0,5 mm abgeschliffen werden, sodass ein Großteil des Materials im Herstellungsprozess verloren geht.

Neben Furnierstreifen mit länglich angeordneten Holzfasern, sind auch sog. Querfurniere erhältlich, deren Fasern auf der Oberseite in Querrichtung verlaufen (Abb. 7). Diese erweitern die Möglichkeiten der Wickeltechnik hinsichtlich der Faserausrichtung bei unterschiedlichen Geometrien. Hier ist auch eine kombinierte Anwendung mit wechselweisem Lagenaufbau denkbar, um die strukturellen Eigenschaften eines Bauteils zu optimieren.



Abb. 7 Querfurnier mit zweilagigem Aufbau: Unterseite mit Fasern in Längsrichtung, Oberseite mit Fasern in Querrichtung



2.2 Klebstoffsystem

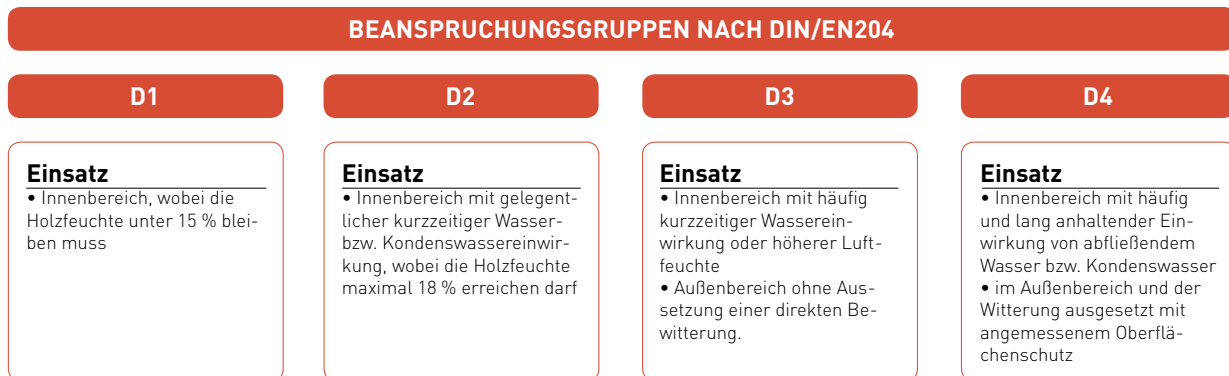


Abb. 8 Beanspruchungsgruppen D1-D4 nach DIN/EN 204

Zur Fügung der einzelnen Schichten untereinander wird nach jeder Lage eine definierte Menge Klebstoff aufgetragen.

Bei der Wahl eines geeigneten Klebstoffsystems haben sich die Untersuchungen auf Produkte konzentriert, die den Einsatz im Außenbereich nach DIN/EN 204 (DIN e. V. 2021) (Abb. 8) zulassen und speziell für den tragenden Holzleimbau entwickelt wurden (Jowat SE 2021a).

Für die Untersuchungen wurden unterschiedliche 1- und 2-komponentige Klebstoffsysteme auf Basis von Polyurethan, EPI und PVAc getestet, die speziell für den tragenden Holzleimbau entwickelt wurden. Alle untersuchten Klebstoffe wurden vom Industriepartner Jowat SE bereitgestellt. Abb. 9 zeigt einen Überblick der untersuchten Klebstoffsysteme mit relevanten Eigenschaften. Ausschlaggebend sind für die Untersuchungen und spätere Prozess-Integration des Klebstoffauftrags insbesondere die offene Zeit, die je nach Fabrikationsstrategie eher kurz oder sehr lang sein sollte, sowie die Viskosität des Klebstoffs.

Folgend ein kurzer Überblick über die getesteten Klebstoffe – eingeteilt nach ihrer jeweiligen Basis: Polyurethan (PU), Emulsion-Polymer-Isocyanat (EPI) und thermoplastische Polyvinylacetat (PVAc).

Polyurethan-Klebstoffe

PUR-Klebstoffe gehören zu den Reaktionsklebstoffen und bestehen aus verschiedenen Isocyanattypen (Harzkomponente) und Polyolverbindungen (Härter), welche miteinander zu Polyurethan reagieren. Sie sind sowohl als 1K- als auch 2K-Systeme erhältlich und binden chemisch ab. Während bei 1K-PU-Klebstoffen der Isocyanat-Anteil bei Gebrauch mit der Luftfeuchtigkeit reagiert und härtet, findet die Reaktion bei 2K-Systemen erst nach dem Mischen statt. Eine Einstellung der Eigenschaften von weichelastisch bis hin zu sehr hart ist über die Auswahl der entsprechenden Harzkomponente realisierbar (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat 2021).

Polyvinylacetat-Klebstoffe

Klebstoffe auf Basis von Polyvinylacetat – kurz PVAc – sind physikalisch abbindende Klebstoffe, die eine hohe Adhäsion gegenüber Holz und anderen Materialien aufweisen. Neben der physiologischen Unbedenklichkeit, kurzen Abbindezeit und Fugenfüllvermögen, zählt eine gute Wasserverdünnbarkeit und Verträglichkeit mit anderen wässrigen Klebstoffen zu den Vorteilen von PVAc-Klebstoffen (Dunky und Niemz 2002, 426). Darüber hinaus bieten reaktive PVAc-Dispersionen eine formaldehydarme Verleimung und einen deutlich geringeren Klebstoffbedarf gegenüber den früher häufig eingesetzten UF-Harzen (Jowat SE 2021b). Nachteilig ist die Empfindlichkeit zur Kriechneigung der Klebefuge sowie das thermoplastische Verhalten (Dunky und Niemz 2002, 426).



UNTERSUCHTE KLEBSTOFFE

JOWAPUR® 681.10-60

Basis

- Polyurethan

Typ

- 1K

Anwendungsbereich

- Herstellung von geklebten tragenden Holzbauteilen

Beanspruchungsgruppe

- D4

Viskosität [mPas]

- 15.500 ± 2.500

Offene Zeit [min]

- 10-60

Dichte [g/cm³]

- 1,15

JOWAPUR® 686.10-60

Basis

- Polyurethan

Typ

- 1K

Anwendungsbereich

- Brettschichtholz und Keilzinkenverbindung

Beanspruchungsgruppe

- D4

Viskosität [mPas]

- 10.200 ± 2.500

Offene Zeit [min]

- 30-70

Dichte [g/cm³]

- 1,15

JOWACOLL® 102.49

Basis

- EPI-Dispersion

Typ

- 2K

Anwendungsbereich

- für Verleimungen mit direkter Außenbewitterung

Beanspruchungsgruppe

- D4

Viskosität [mPas]

- ca. 11.000

Offene Zeit [min]

- 10 ± 2

Dichte [g/cm³]

- 1,5

JOWACOLL® 103.70

Basis

- PVAc-Dispersion

Typ

- 1K

Anwendungsbereich

- Massivholzplattenherstellung

Beanspruchungsgruppe

- D3

Viskosität [mPas]

- ca. 10.000

Offene Zeit [min]

- 6 ± 1

Dichte [g/cm³]

- 1,08

Abb. 9 Untersuchte Klebstoffsysteme

Emulsion-Polymer-Isocyanat-Klebstoffe

EPI-Klebstoffe gehören zur Gruppe der Dispersionsklebstoffe. Durch die Vernetzung mit einem Isocyanat und der daraus entstehenden chemischen Reaktion wird das thermoplastische Verhalten wesentlich reduziert. Ein ausgehärteter EPI-Klebstoff ist im Gegensatz zu einer PVAc-Dispersion, die einen zähelastischen Film ausbildet, hart bis spröde (Jowat SE 2021c). Ihre Eigenschaften sind somit ähnlich zu duroplastischen Klebstoffen, was sie für bestimmte tragende Verbindungen qualifiziert (Brockmann et al. 2005, 254).

Wasserbasierte Thermoset Kunstharze

Wasserbasierte Kunstharze bieten dieselben Vorteile wie konventionelle Kunstharze, jedoch mit verringertem ökologischen Fußabdruck. Produkte, wie das zum Test verwendete Acrodur 950 L von BASF, basieren auf einer Acryl Suspension, die unter Druck bei 180°C -200°C polymerisieren und eine permanente Verbindung bildet (BASF SE 2018).

Knochenleim

Knochenleim gehört zu den sogenannten Glutinleimen. Diese werden aus Tierproteinen gewonnen (Brandis 1990, 123-124). Glutinleim wird in der Regel warm verarbeitet. Er zeichnet sich durch eine hohe Anfangsfestigkeit und einer hohen Endfestigkeit aus. Glutinleime sind reversibel durch Feuchtigkeits- und/oder Hitzeeinwirkung. Durch die Einmischung von verschiedenen Zusätzen können sowohl die Elastizität als auch die Wasserfestigkeit beeinflusst werden (Kremer Pigmente GmbH & Co. KG 2011).



2.3 Untersuchungen des Materialsystems

Um die Belastbarkeit des Materialsystems zu überprüfen und Aussagen zum Einfluss des Faserverlaufs und inneren Lagenaufbaus späterer Bauteile treffen zu können, wurden in Kooperation mit dem Fachgebiet Tragwerksentwurf der Universität Kassel Belastungstests an kleinen Materialproben durchgeführt. Die untersuchten Testkörper haben eine Größe von 50x150mm und bestehen aus insgesamt 12 Lagen à 0,5mm dickem Furnier, die miteinander verleimt wurden und aus denen eine Materialstärke von 6mm resultiert.

Für die Untersuchungen wurde eine exemplarische Bauteilgeometrie gewählt, aus der dann Probekörper mit unterschiedlichen Faserrichtungen hergestellt wurden (Abb. 10): (a) alle Lagen mit Fasern in Querrichtung, (b) alle Lagen mit Fasern in Längsrichtung. Die einzelnen Lagen wurden dabei jeweils um die halbe Furnierbreite (24mm) zueinander versetzt angeordnet, um die Position der Klebefugen zu variieren.

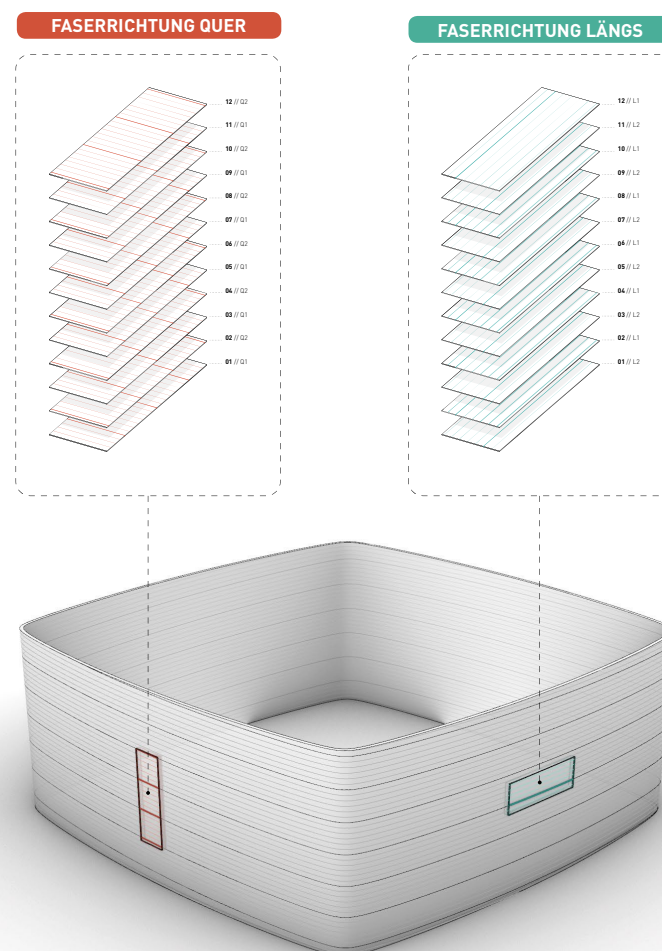


Abb. 10 Exemplarische Bauteilgeometrie mit den beiden Probekörpern: Fasern in Querrichtung (links) und in Längsrichtung (rechts)



Zugversuch



Abb. 11 Zugversuch der Probekörper

Die Ergebnisse des Zugversuchs zeigten, dass die Proben in der Nähe des Greifers sowohl parallel als auch senkrecht zur Faserrichtung versagten. Die Proben mit Fasern in Längsrichtung weisen ein Vielfaches der Zugfestigkeit wie die der querfaser-orientierten Probekörper auf. Die Mindestbruchkraft der Probekörper beträgt ca. 4.500 bzw. 13.000N (Abb. 12).

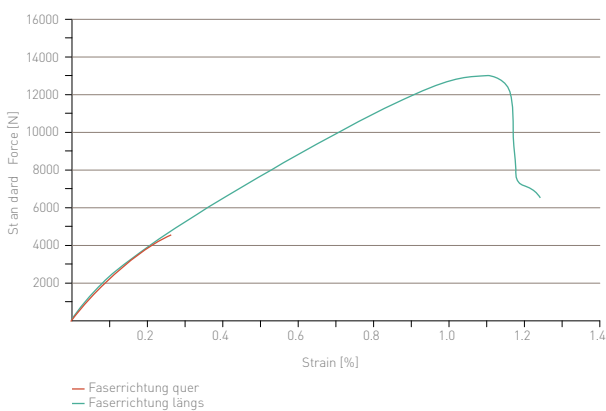


Abb. 12 Vergleich der Zugfestigkeiten der beiden Probekörper

Druckversuch

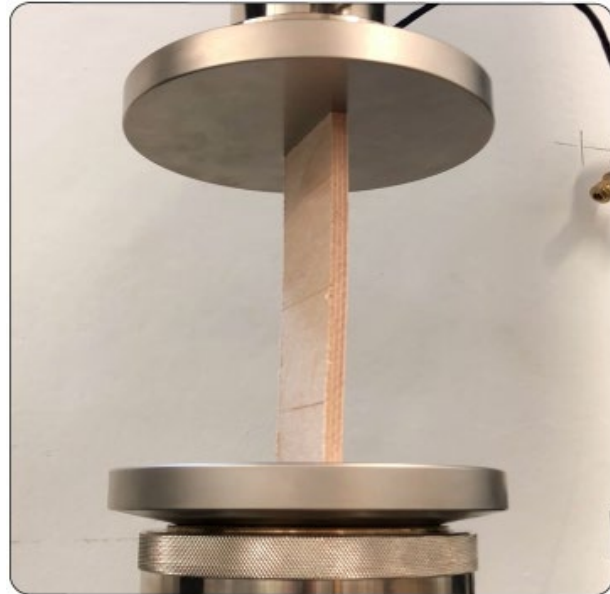


Abb. 13 Druckversuch der Probekörper

Auch die Druckversuche zeigten wie erwartet, dass die Probekörper mit einem parallelen Faserverlauf ein Vielfaches der Druckfestigkeit der Proben mit Fasern in Querrichtung aufweisen. Die Mindestbruchkraft der Probekörper beträgt hier ca. 2.000 bzw. 14.000N (Abb. 14).

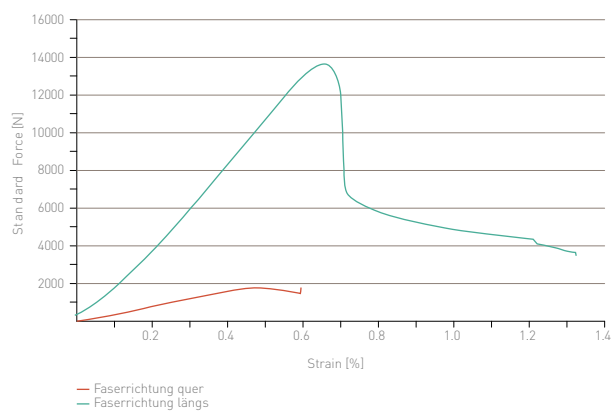


Abb. 14 Vergleich der Druckfestigkeiten der beiden Probekörper



Zugversuch mit kombiniertem Lagenaufbau

Darauffolgende Untersuchungen sollten die Belastbarkeit bei einem kombinierten Lagenaufbau überprüfen. Insbesondere sollte der direkte Einfluss der Integration einzelner Längslagen in das Materialsystem untersucht werden. Hierfür wurden wiederum Probekörper mit folgendem Lagenaufbau auf Zug getestet und miteinander verglichen: (a) alle Lagen mit Fasern in Querrichtung, (b) 9 Lagen mit Fasern in Querrichtung und 3 Lagen in Längsrichtung (Abb. 15).

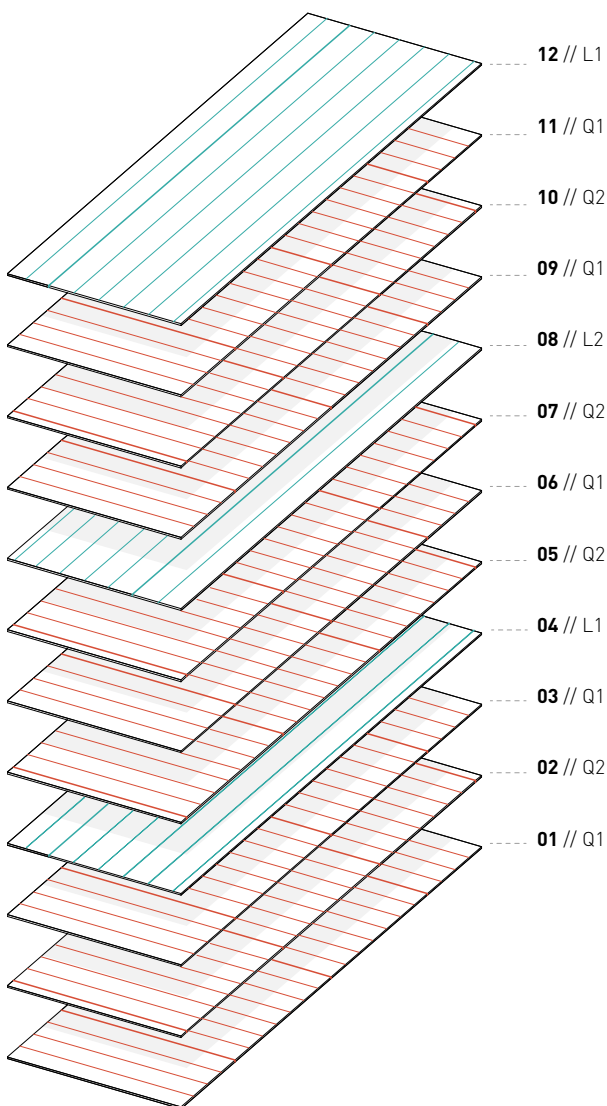


Abb. 15 Lagenaufbau der Testkörper für Belastungstests

Die Ergebnisse des Zugversuchs zeigten, dass die Proben in der Nähe des Greifers sowohl parallel als auch senkrecht zur Faserrichtung versagten (Abb. 16). Die Mindestbruchkraft der Probekörper mit 9 Querslagen und 3 integrierten Längslagen beträgt 9897,58 kN, was 33,27 N/mm² entspricht; die der Probekörper mit 12 Querslagen lediglich 12,06 N/mm² (Abb. 17). Mit der Integration der Längslagen konnte die Zugkraft der Testkörper somit um das Dreifache erhöht werden.

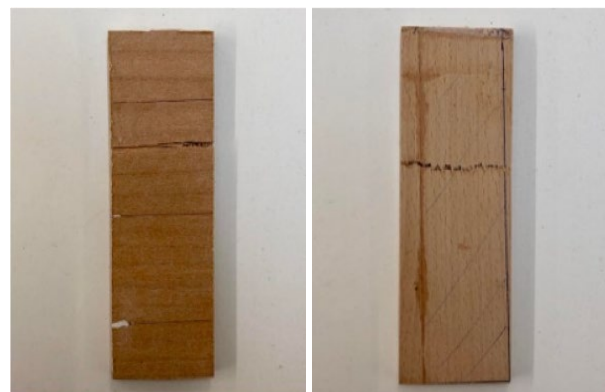


Abb. 16 Zugversuch und Versagensarten der Probekörper

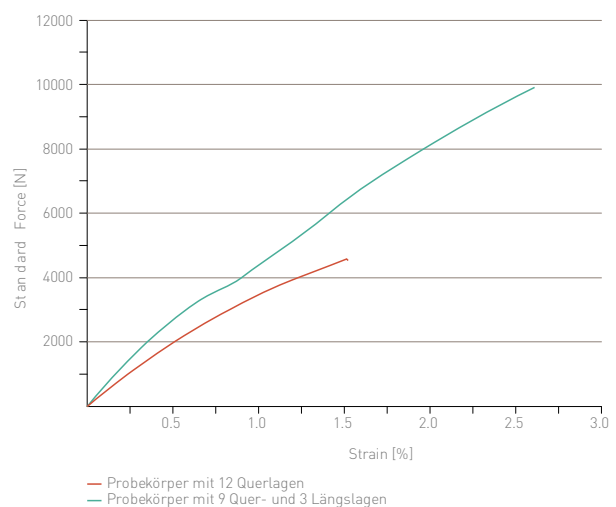


Abb. 17 Zug-Dehnungs-Kurve der beiden Probekörper



3 WICKELPROZESS

3.1 Generierung von Wickellinien

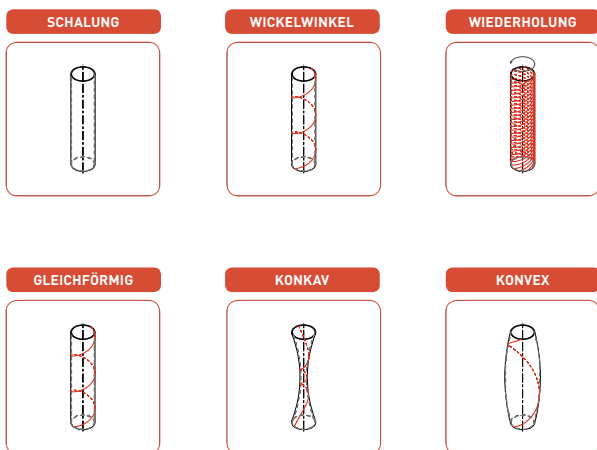


Abb. 18 Wickellinien

Für die robotische Herstellung werden Wickellinien mit einem definierten Startpunkt und Wickelwinkel entlang eines Schalungselements generiert (Abb. 18). Bei mehreren Furnierstreifen wird die Linie entlang der Schalung rotiert. Für die Generierung eines Werkzeugpfades werden lokal geodätische Liniensegmente auf der zu wickelnden Fläche berechnet. Bei komplexeren Flächen wird die geodätische Kurve an die Position mit hoher negativer Krümmung angezogen. Durch Deformation der Bauteilgeometrie lässt sich somit - je nach Anwendungsfall - eine optimale Materialverteilung durch die Platzierung des Furniers einstellen.

Für die Herstellung von fugenlosen, gleichförmigen Hohlprofilen sind drei entscheidende Parameter für den Wickelwinkel ausschlaggebend (Abb. 19): Zum einen der Umfang der abgewickelten Fläche, die Anzahl der Furnierstreifen pro Lage und die Furnierbreite.

In Abhängigkeit der genannten Parameter wird der Startwinkel der geodätischen Linie (Wickellinie) mathematisch errechnet. Das Profil wird parallel zum Querschnitt in gleich große Segmente unterteilt, die der Breite des Furnierstreifens entsprechen. Damit ein fugenloses Bauteil entstehen kann, muss der Startpunkt der zweiten Umrundung des Profils exakt an derselben Stelle liegen wie der Endpunkt nach einer Umrundung.

Der errechnete Winkel muss nach jeder Lage neu bestimmt werden, da sich der Durchmesser und damit der Umfang in Abhängigkeit der Materialstärke des Furniers vergrößert. Damit ergibt sich eine geringe Abnahme des Wickelwinkels: Je breiter das Profil wird, desto flacher wird also der Winkel. Ebenso ändert sich der Wickelwinkel in Abhängigkeit zur Furnierbreite. Je breiter das Furnierband, desto steiler wird der Winkel. Außerdem entscheidend für die Berechnung des Startwinkels ist die Anzahl der Furnierstreifen pro Lage. Mit der Erhöhung der Anzahl lässt sich der Winkel um ein Vielfaches steigern. Verändert man nun zusätzlich zur Furnieranzahl auch dessen Breite, steigt der resultierende Wickelwinkel stärker an.

3.2 Wickelwinkel

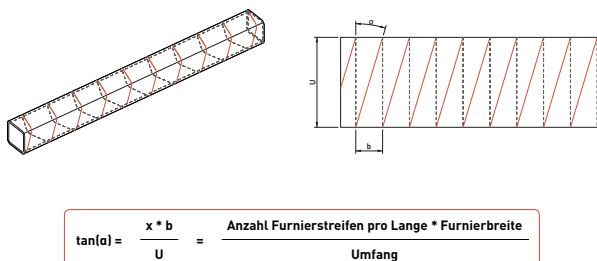


Abb. 19 Parameter zur Bestimmung des Wickelwinkels

3.3 Lagenaufbau

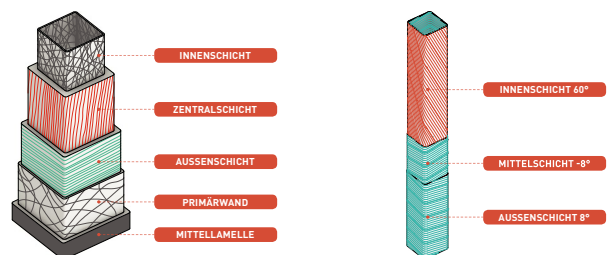


Abb. 20 Aufbau verholzte Zellwand (l.), Lagenaufbau Hohlprofil (r.)

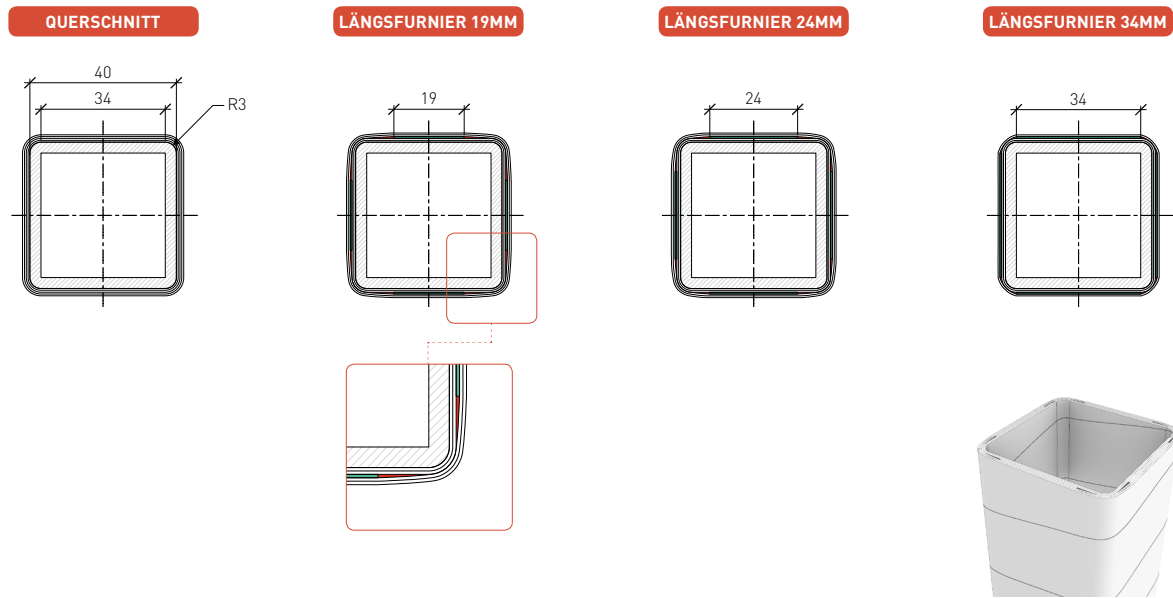


Abb. 21 Mögliche Fugenbildung bei Integration von Furnierstreifen in Längsrichtung

Interessant sind diese Untersuchungen insbesondere aufgrund der natürlichen Faserrichtung des Furniers. Für optimierte Bauteileigenschaften und eine Erhöhung der Biegefestigkeit empfiehlt sich eine Ausrichtung der Fasern in Längsrichtung. Abb. 20 zeigt die Analogie zum Aufbau einer verholzten Zellwand. Zusätzlich verhindert ein kreuzweiser Lagenaufbau ein späteres Quellen des Bauteils, da Holz in Faserrichtung weniger quillt.

Demnach wäre eine Integration von Längsfurnieren entlang des Bauteils sinnvoll. Problematisch hierbei gestaltet sich lediglich eine mögliche Fugenbildung, die je nach gewählter Furnierbreite unterschiedlich stark ausgeprägt ist.

In den kleinmaßstäblichen Untersuchungen wurde sich daher auf bis zu sechs Furnierbänder pro Lage fokussiert, woraus sich ein Winkel von ca. 50° ergibt. So lässt sich ein fugenloses Bauteil erzeugen, dessen Eigenschaften nicht negativ beeinträchtigt werden. Untersucht wurden hierbei sowohl runde als auch rechteckige Profile (Abb. 22 / Abb. 23).

Dabei wurden Elemente mit uni- als auch bidirektional gewickeltem Lagenaufbau sowie die Frage, welchen Einfluss Wickelwinkel und das Wickelmuster auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils haben, untersucht.



Abb. 22 Rundhohlprofil mit abwechselnd 1 / 6 Furnierbändern



Abb. 23 Rechteckhohlprofil mit abwechselnd 1 / 6 Furnierbändern



3.4 Freiformgeometrien



Abb. 24 Generierung von Wickellinien an unterschiedlichen Freiformen

Im Gegensatz zu gleichförmigen Hohlprofilen ohne variierende Querschnitte, bei denen der Wickelwinkel konstant ist, verändert sich dieser bei Freiformgeometrien auf jedem einzelnen Punkt der Fläche aufgrund der variierenden Krümmung der Fläche selbst: In Bereichen mit negativer Krümmung verringert sich der Wickelwinkel senkrecht zur Rotationsachse, wohingegen sich der Winkel in Bereichen mit positiver Krümmung erhöht (Abb. 24). Dabei bestimmt der Startpunkt und Winkel die jeweilige Positionierung und Ausrichtung der späteren Furnierlage.

Durch Wiederholung bzw. Rotation der generierten Wickellinie entlang der Geometrie kann eine erste Lage ausgebildet werden. Aufgrund der zuvor beschriebenen Änderung des Wickelwinkels entlang der Geometrie verdichten sich die Wickellinien in Bereichen mit konkaver Krümmung, wohingegen sich die Linien in konvexen Bereichen aufspreizen (Abb. 25).

In Folge entsteht eine über die Bauteilgeometrie steuerbare Materialverteilung des Furniers. Gleichzeitig lässt sich hierüber auch der Faserverlauf kontrollieren und verändern, z.B. von einer eher horizontalen Ausrichtung hin zu einem vertikalen Verlauf.

Eine entgegengesetzte Ausrichtung der Furnierstreifen in der darauffolgenden Lage verleiht dem Bauteil seine benötigte Stabilität. Durch Versetzen und wechselweises Wickeln können die Furnierstreifen darüber hinaus miteinander verwebt werden.

Im Gegensatz zu gleichförmigen, regelmäßigen Profilen (Kap. 3.2), die geschlossene Körper mit konstanter Materialstärke abbilden, resultiert bei Freiformgeometrien aufgrund der sich ändernden Krümmung ein Muster mit offenen Stellen und variierenden Wandstärken. Dabei ist der Faktor zwischen dem schmalsten und breitesten Querschnitt von besonderer Bedeutung. Je größer der breiteste Durchmesser wird, umso größer werden die Lücken zwischen den Furnierstreifen. Gleichzeitig könnten zu klein gewählte Querschnitte in Relation zum größten Bauteildurchmesser zu Überlappungen führen. Dieses Prinzip beeinflusst unmittelbar den Entwurfsprozess der Bauteile.

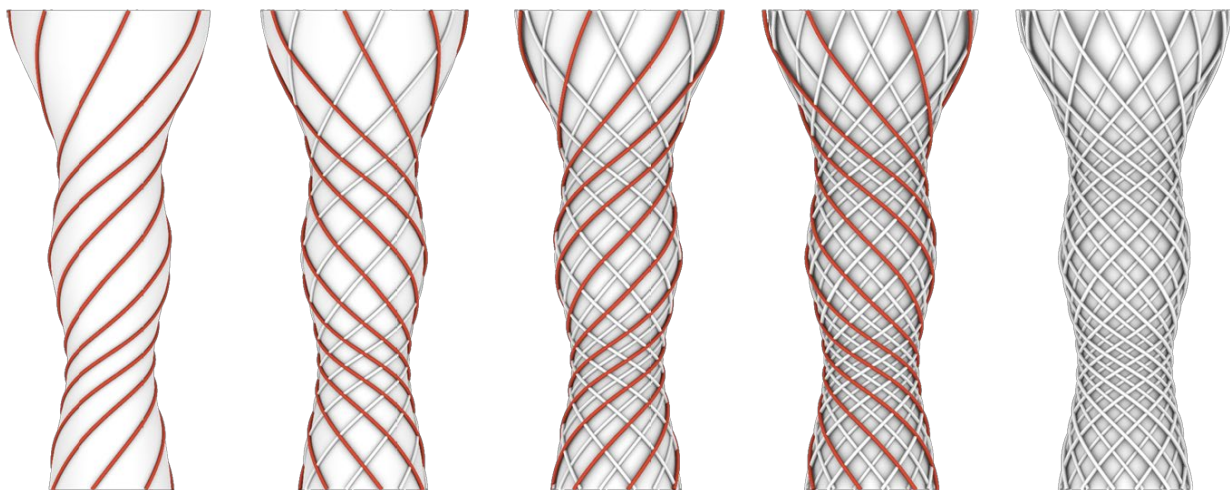


Abb. 25 Generierung von Wickellinien und einzelner Lagen auf einer Freiformgeometrie



4 ROBOTISCHE FABRIKATION

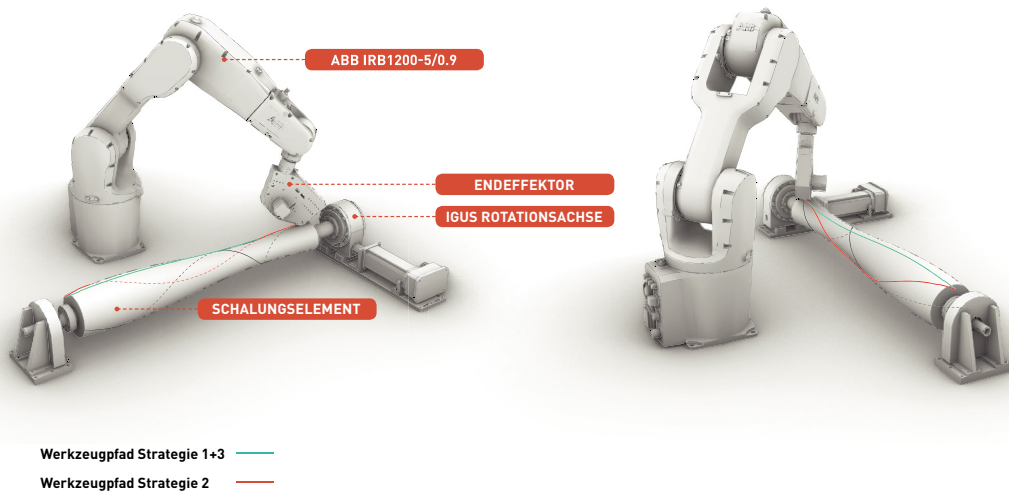


Abb. 26 Aufbau der Roboteranlage in kleinem Maßstab

4.1 Aufbau der Roboteranlage

Zur Herstellung der einzelnen Lagen bewegt sich ein Roboterarm mit integriertem Auftragswerkzeug entlang der zuvor generierten Werkzeugpfade. Simultan rotiert das auf einer externen Rotationsachse montierte Schalungselement.

Für die kleinmaßstäblichen Versuche wurde hierfür ein ABB IRB 1200 Roboter mit Endeffektor und externer Drehpositioniereinheit verwendet (Abb. 26). Diese ist in die Hauptsteuerung des Roboters integriert. Dabei wird die Drehgeschwindigkeit des Werkstückpositionierers durch inverse Kinematik von ABB berechnet.

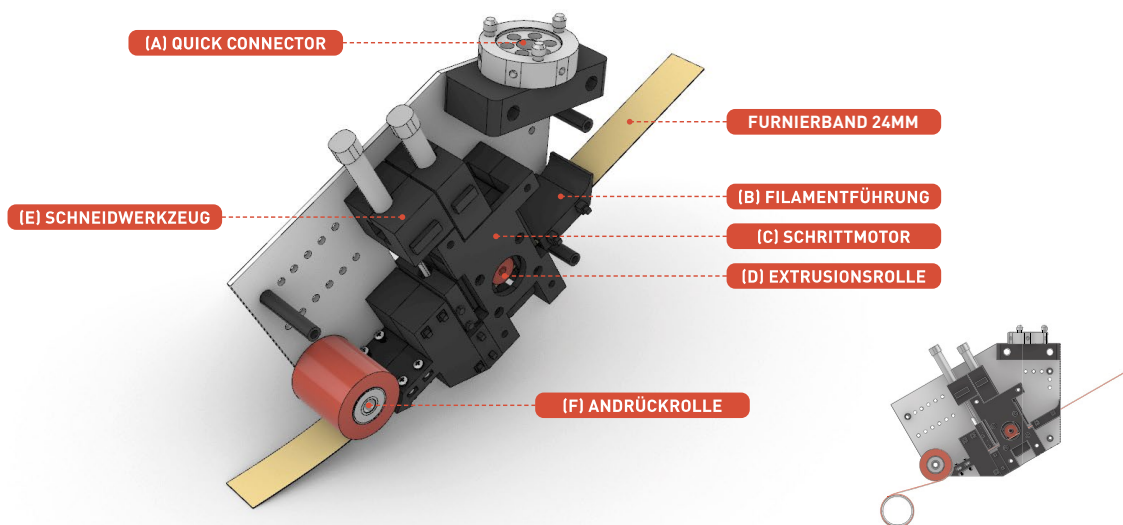


Abb. 27 Endeffektor-Design



Zum Auftrag des Furniers auf dem Schalungselement wurde als Roboterwerkzeug ein spezieller Endeffektor, bestehend aus folgenden Bauteilen, entwickelt: (a) Schnellwechselplatte, (b) Filamentführung, (c) Schrittmotor, (d) Extrusionsrolle, (e) Schneidwerkzeug und (f) Andrückrolle (Abb. 27).

Dabei wird das Furnierband über eine am (c) Schrittmotor befestigte (d) Extrusionsrolle durch die (b) Filamentführung nach vorn geschoben. Mit der (f) Andrückrolle lässt sich das Furnier präzise auftragen und das pneumatisch aktuiere (e) Messer übernehmen den Zuschnitt des Furniers nach einer gewickelten Lage.

Die robotische Ansteuerung erfolgte dabei mittels *Robot Components* - einem am Fachgebiet EDEK entwickelten Open Source Add-On für *Grasshopper* in *Rhino* (Abb. 28). Der damit generierte Code kann entweder direkt oder über *Robot Studio* an das *ABB*-Roboter System gesendet werden. Der Schrittmotor für die Extrusion des Furniers wurde extern über einen Mikrocontroller (Arduino) und Funken angesteuert. Die Ansteuerung der unterschiedlichen Einheiten wurde über einen Profinet-Verteiler und einer Ventilinsel gewährleistet.

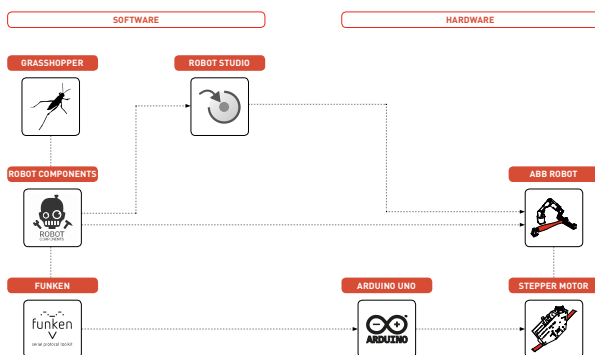


Abb. 28 Workflow zur robotischen Fertigung und verwendete Software

4.2 Werkzeugpfad

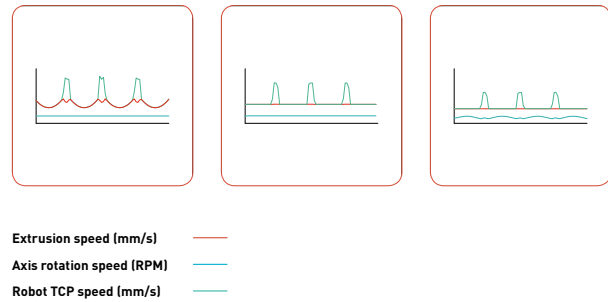


Abb. 29 Strategien zur Ansteuerung der entscheidenden Parameter

Für die robotische Ansteuerung und folgende Fabrikation wurde aus den zuvor erzeugten Wickellinien ein Werkzeugpfad generiert. Dabei gibt es unterschiedliche Strategien zur Erzeugung des Werkzeugpfads.

Die entscheidenden Parameter, welche synchronisiert und aufeinander abgestimmt werden müssen, sind hierbei wie folgt: (a) Extrusionsgeschwindigkeit des Filaments, (b) Geschwindigkeit der Rotationsachse und (c) Geschwindigkeit des Roboters selbst (Abb. 29).

In Abhängigkeit der Bauteilgeometrie können die Parameter entweder konstant oder variabel gehalten werden. In den bisherigen Untersuchungen wurde weitestgehend mit Strategie 2 gearbeitet, um möglichst viele Parameter konstant zu halten und unnötige Fehlerquellen zu eliminieren.

Die Bildsequenzen in den Abb. 30 / Abb. 31 zeigen die resultierende Bewegung des Roboters bei gleichzeitiger Rotation der Drehpositioniereinheit. Im Vergleich zu Rundprofilen, bei denen der Roboter einen linearen Pfad abfährt, entstehen deutlich komplexere Bewegungen aufgrund des Werkzeugpfads entlang des rechteckigen Profils. Zudem resultieren deutliche Unterschiede bei unterschiedlichen Wickelwinkeln, z.B. entlang einer steilen Wickellinie bei 6 Furnierbändern pro Lage oder aber bei einem wesentlich flacheren Winkel mit lediglich einem Furnierband.

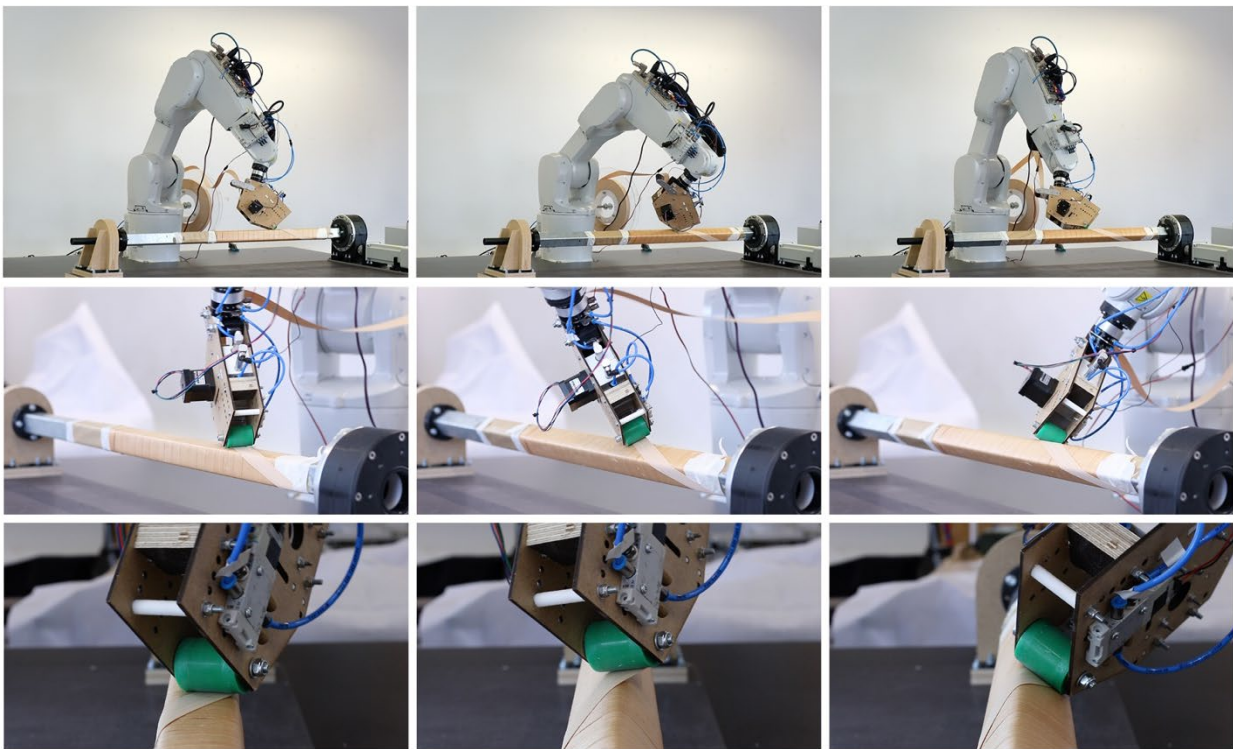


Abb. 30 Resultierende Bewegungen bei steilem Wickelwinkel mit sechs Furnierbändern pro Lage

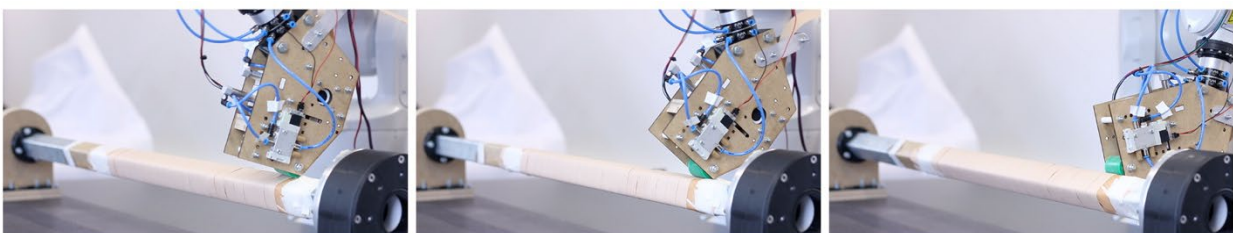


Abb. 31 Resultierende Bewegungen bei flachem Wickelwinkel mit einem Furnierband pro Lage



4.3 Fügung

Klebstoffauftrag & Anpressdruck

Für eine ausreichende Haftung der einzelnen Furnierlagen untereinander ist je nach Klebstoffsystem ein definierter Anpressdruck vorgesehen. Der hierfür benötigte Anpressdruck liegt bei den verwendeten Klebstoffen zwischen 0,6 - 1,0 N/mm². Dieser Richtwert resultiert aus dem tragenden Holzleimbau mit sehr langen Holzbauteilen, indem hohe Pressdrücke nötig sind, um die Fugen möglichst gering zu halten. Bezogen auf Furnierholz in kleinerem Maßstab lässt sich der benötigte Anpressdruck um ein Vielfaches reduzieren.

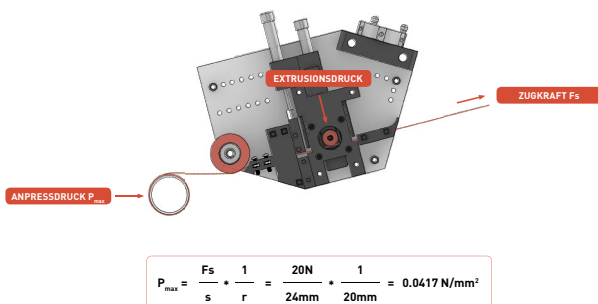


Abb. 32 Anpressdruck auf das Bauteil im robotischen Wickelprozess

Untersuchungen zeigten, dass der ermittelte Druck bei Rundprofilen über Zug des Furniers ausreicht, um die Furnierlagen miteinander zu fügen, da sich der Druck gleichmäßig entlang des Profils aufbaut. Bei Rechteckprofilen hingegen baut sich der Druck im Wickelprozess an den Ecken des Profils auf, wodurch sich das Furnier an den geraden Flächen leicht aufwölbt und unerwünschte Fugen entstehen können (Abb. 34). Insbesondere bei steileren Wickelwinkeln entstehen in diesen Bereichen Wölbungen, die sich mit einer zusätzlich gewickelten Lage - in einem sehr flachen Winkel - wieder andrücken lassen (Abb. 33).



Abb. 33 Aufwölben des Furniers bei steilen Wickelwinkeln

Im robotischen Wickelprozess wurde das Holzfurnier durch die mit dem Schrittmotor verbundene Extrusionsrolle auf Zug gehalten, wodurch ein Anpressdruck am Wickeldorn resultiert. Messungen mit einem Zug-/Druck-Messgerät ergaben eine Zugkraft F_s von ca. 20N (Abb. 32).

Abb. 35 zeigt eine Gegenüberstellung verschiedener Lösungen zu Anpresstechniken. Alternative Möglichkeiten zum Anpressen mittels Zugkraft stellt ein Druckaufbau über die im Endeffektor verbaute Andrückrolle im Wickelprozess dar oder ein nachträgliches Verpressen via Vakuum-Pumpe. In Abhängigkeit der Bauteilgeometrie kann entschieden werden, wie der benötigte Anpressdruck aufgebracht wird.

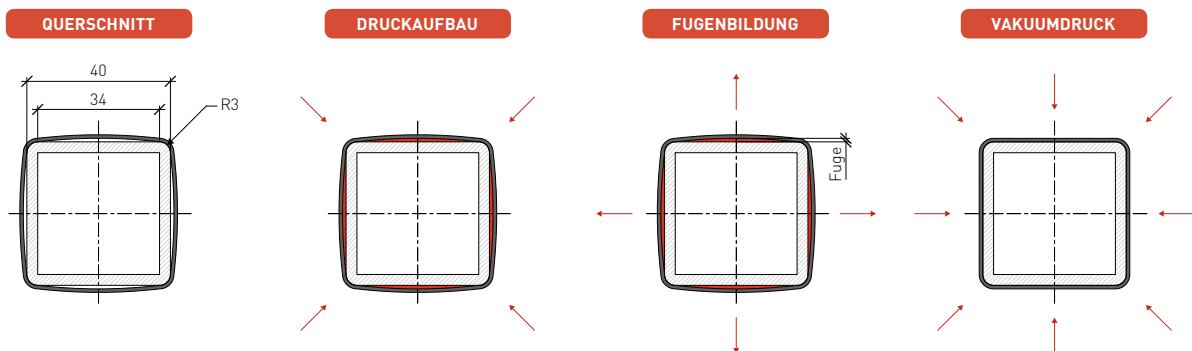


Abb. 34 Fugenbildung bei Rechteckprofilen und Druckaufbau mittels Vakuum



Abb. 35 Gegenüberstellung verschiedener Anpresstechniken

Je nach Technik ergeben sich daraus unterschiedliche Anforderungen an Klebstoffsystem, -auftrag und Programmierung. Wird das Furnier lediglich auf Zug gehalten, sollte ein Klebstoff mit relativ kurzer offener Zeit verwendet werden. Kann der Druck nur über die Andrückrolle aufgebracht werden, ist ein sehr schnell aushärtender Klebstoff im Sekundenbereich nötig, der die Furnierlagen unmittelbar im Wickelprozess miteinander vollständig verklebt. Für beide Möglichkeiten wird der Klebstoffauftrag im Prozess integriert und stellt damit hohe Anforderungen an das Dosier- und Applikationssystem – insbesondere die Handhabung bei Klebstoffsystemen mit einer sehr kurzen offenen Zeit gestaltet sich dabei deutlich schwieriger.

Eine weitere Option stellt ein nachträgliches Verpressen mittels Andrückrolle nach jeweils einer gewickelten Lage dar, was den Werkzeugpfad zunächst vereinfacht, den Prozess allerdings gleichzeitig verlangsamt. Ebenso ist dies nur über bestimmte Geometrien realisierbar.

Eine unkomplizierte Möglichkeit im Hinblick auf das Dosier- und Applikationssystem, die innerhalb der Forschungsarbeiten näher untersucht wird, ist das nachträgliche Verpressen mittels Vakuumpumpe am Ende des Fertigungsprozesses. Ein längerer Druckaufbau gewährleistet eine kontrollierte Verklebung der Furnierlagen. Bei aufgewölbten Flächen (z.B. bei Rechteckprofilen) wird der Druck durch den Vakuumsack gleichmäßig auf alle Flächen verteilt und somit dadurch eine homogene Kräfteverteilung garantiert (Abb. 36 / Abb. 37).

Diese Technik ist ebenso anwendbar für geometrisch komplexere Bauteile. Um ein Umformen während des Pressens noch zu ermöglichen, ist hierfür ein Klebstoff mit einer langen offenen Zeit notwendig, der noch nicht vollständig ausgehärtet ist.



Abb. 36 Nachträgliches Verpressen mittels Vakuum



Abb. 37 Verpresstes Rechteckhohlprofil im Vakuumsack

Thermisch aktivierbare und aushärtende Klebstoffe

Eine weitere Alternative zum nachträglichen Verpressen mittels Vakuum stellen Hotmelt-Klebstoffsysteme mit einer sehr hohen Anfangsfestigkeit dar. Bei diesen Klebstoffen könnte das Furnierband mit einer definierten Klebstoffmenge zunächst vorbeschichtet werden. Der Klebstoff trocknet an dem Furnier an und bildet ein einsatzbereites Materialsystem. Unter Einwirkung von Hitze lässt sich der Klebstoff im Prozess aktivieren; er verflüssigt sich dabei.

Der Vorteil an diesem zweistufigen Verfahren ist, dass der Klebstoffauftrag selbst aus dem robotischen Auftragsprozess ausgegliedert werden kann. Dies vereinfacht das Auftragswerkzeug, da hier lediglich die Integration eines Systems für die Hitzezufuhr nötig ist. Darüber hinaus wird die für den robotischen Auftragsprozess notwendige Einrichtung auf ein Minimum reduziert, da das Klebstoffapplikationssystem und die Leitungen zur Dosierpumpe ausgegliedert werden können.

Ebenso sind Kombi-Klebstoffsysteme denkbar - bestehend aus einem Hotmelt-Klebstoff mit einer sehr hohen Anfangsfestigkeit, der lediglich punktuell aufgetragen wird und einem zweiten Klebstoff, welcher die benötigte Endfestigkeit bringt. Dieser Lösungsansatz erfordert den Einsatz und die Integration zweier Applikationssysteme im Endeffektor.

Neben Untersuchungen zu den erwähnten PUR-, EPI- und PVAc-Klebstoffen fanden weitere Tests mit einem thermisch aktivierbaren Klebstoff (Knochenleim) sowie einem thermisch aushärtenden Klebstoffsystem (Acrodur).

In den Untersuchungen wurden jeweils zwei Furnierstreifen mit den Abmessungen 150 x 48mm und einer Stärke von 0,5mm mit jeweils 100g/m² Klebstoff beschichtet und bei einer Raumtemperatur von 20°C angetrocknet. Der Knochenleim wurde hierfür zuvor auf 60°C erhitzt. Bei beiden Versuchen wölbte sich der Furnierstreifen bereits nach kurzer Zeit quer zur Faserrichtung auf; bei dem mit Acrodur beschichteten Furnierband nach ca. 60s, im Test mit Knochenleim ca. 30s.

Die Untersuchungen zeigten, dass ein Vorbeschichten des Furniers mit den getesteten thermisch reaktivierbaren Klebstoffen für unseren Prozess mit einer Furnierstärke bis 0,5mm ungeeignet ist. Dieses zweistufige Verfahren käme mit den ausgewählten Produkten daher nur bei dickeren Furnieren ab 1,0mm in Frage.



5 BAUTEILGEOMETRIE

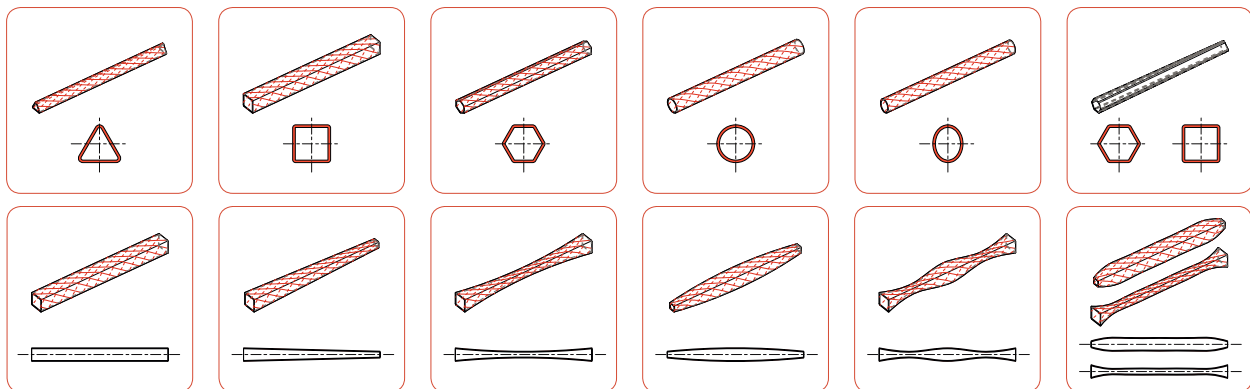


Abb. 38 Mögliche Bauteilgeometrien mit unterschiedlichen Profilen (oben) und Querschnitten (unten)

Um herauszufinden, welche Bauteilformen sich für den Fertigungsprozess eignen und wo die geometrischen Möglichkeiten und Grenzen dieser Herstellungstechnik liegen, lässt sich die Bauteilgeometrie unterteilen in ihr Profil, den zugehörigen Querschnitt und die Skalierung (Abb. 38). Daraus resultieren jeweils unterschiedliche Anforderungen an das Materialsystem, Schalung und Herstellungsprozess.

5.1 Profile & Querschnitte

Mögliche Hohlprofile sind dabei unter anderem (a) dreieckige, (b) rechteckige, (c) hexagonale, (d) kreisförmige, (e) ellipsoide sowie (f) variable Profile. Bei näherer Betrachtung ergeben sich je nach Biegeradius unterschiedliche Anforderungen an die Zugfestigkeit und Elastizitätsgrad und damit verbunden an die Materialstärke des Furniers. Gleichzeitig variieren die Prozessanforderungen in Abhängigkeit des Profils. Bei runden Profilen lässt sich beispielsweise das Furnierband während der Herstellung besser auf Spannung halten und es entstehen im Vergleich zu eckigen Profilen höhere Prozessgeschwindigkeiten aufgrund weniger komplexer Werkzeugpfade (siehe Kap. 4.2). Dagegen begünstigen planare Flächen bei eckigen Profilen die Anschlussmöglichkeiten zum nächsten Bauteil und eignen sich damit für architektonische Anwendungen.

Von (a) gleichförmigen, über (b) konischen, (c) konkaven und (d) konvexen Querschnitten bis hin zu (e) variablen Freiformen ergeben sich weitere Bauteilgeometrien, die ebenso unterschiedliche Anforderungen und Anwendungsmöglichkeiten mit sich bringen (Abb. 38). Durch eine einseitige Verjüngung eines Bauteils können so beispielsweise Anschlüsse zu Elementen mit anderen Abmessungen geschaffen werden. In Abhängigkeit der geometrischen Komplexität des Querschnitts kommen unterschiedliche Schalungssysteme zum Einsatz, um die jeweilige Form abbilden zu können (siehe Kap. 5.2).

Erste Untersuchungen fanden zunächst an gleichförmigen Rund- und Rechteckprofilen im kleinen Maßstab statt (Abb. 39), später an großmaßstäblichen variablen Freiformbauteilen.



Abb. 39 Gewickelte Hohlprofile mit rundem (links) und eckigen (rechts) Profil



5.2 Schalungssystem

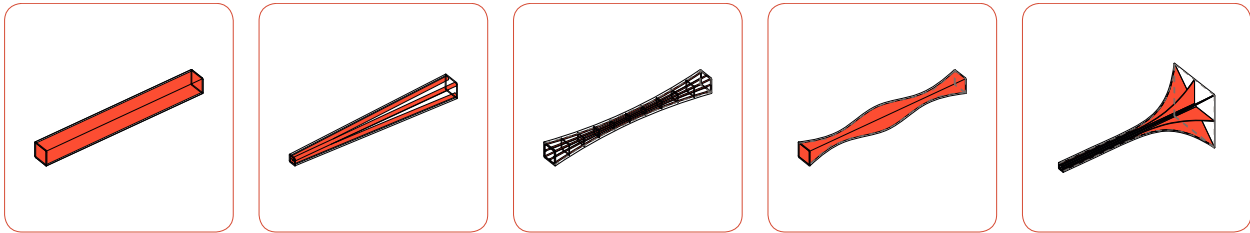


Abb. 40 Mögliche Schalungssysteme für die Herstellung von Hohlprofilen aus Furnierholz

Die Herstellung unterschiedlicher Hohlprofile aus Furnierholz stellt zum Teil hohe Anforderungen an ein geeignetes Schalungssystem. Einerseits muss die Schalung – je nach Bauteilgeometrie – die jeweilige Form abbilden können; gleichzeitig muss sich das System problemlos montieren und demontieren bzw. von dem gewickelten Hohlprofil entfernen lassen. Darüber hinaus ist die Wiederverwendbarkeit des Schalungssystems ein elementarer Faktor, um den ökologischen Aspekten gerecht zu werden.

Mögliche Schalungsvarianten sind u.a. (a) starre Hohlprofile, (b) Schalungen aus verstellbaren Rundstäben, (c) adaptive Systeme, (d) subtraktiv geformte Vollprofile und (e) Spantenschalungen, die innerhalb des Projekts näher untersucht wurden (Abb. 40).

Die verschiedenen Systeme bringen unterschiedliche Vor- und Nachteile mit sich und eignen sich demnach für diverse Einsatzgebiete.

Starre Hohlprofile

Starre Hohlprofile bilden einfache, gleichförmige Geometrien ab. Die Herstellung variabler Querschnitte ist hiermit nicht möglich; für jeden Durchmesser wird ein entsprechender Dorn benötigt, der bei Änderung der Größe gewechselt werden muss. Die Hohlprofile eignen sich demnach für eine mehrfache Ausführung einfacher, gleicher Standard-Bauteile wie beispielsweise runde oder rechteckige Profile.

Darüber hinaus weisen die Wickeldorne eine große Kontaktfläche zwischen Schalung und Furnier auf, was ein Entfernen des gewickelten Bauteils erschwert. Aufgrund des

resultierenden Anpressdrucks ließen sich die gewickelten Hohlprofile in ersten Untersuchungen nach Aushärten des Klebstoffs nur schwer von den Dornen lösen. Hierzu wurden Rundprofile aus Stahl, Aluminium und Kunststoff untersucht (Abb. 41).

Um das Abziehen der ausgehärteten Bauteile zu optimieren, fanden darüber hinaus Tests mit verschiedenen Trennschichten statt – darunter PA- und PVC-Folie sowie ein spezielles Trennmittel. Eine einfache, kosteneffiziente und ökologische Alternative ergab sich durch den Einsatz von herkömmlichem Backpapier (Abb. 42).



Abb. 41 Starre Hohlprofile aus Stahl, Aluminium und Kunststoff



Abb. 42 Rechteckiger Stahldorn mit einer Trennschicht aus Backpapier



Stabschalung



Abb. 43 Stabschalung aus Aluminiumrohren u. variablen Abstandshaltern

Im Gegensatz zu starren Hohlprofilen bieten Stabschalungen aus einzelnen Rohren und Abstandshaltern für eckige Profile eine höhere Variabilität in der Formgebung. Durch den Einsatz unterschiedlich großer und geformter bzw. variabel einstellbarer Abstandshalter kann sich das Schalungssystem unterschiedlicher Querschnittsgeometrien anpassen und ermöglicht beispielsweise die Abbildung konisch zulaufender Profile. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch die geringe Kontaktfläche zum Furnier, welches ein Ablösen des gewickelten Bauteils deutlich erleichtert. Eine Trennschicht wie bei starren Hohlprofilen ist daher nicht nötig.

Da der Anpressdruck im Wickelprozess lediglich über die Ecken aufgebracht wird, wölbt sich das Furnier an den flächigen Bereichen auf (siehe Kap. 4.3). Ein nachträgliches Verpressen mittels Vakuum ist aufgrund der fehlenden Kontaktfläche nicht ohne weiteres möglich. Darüber hinaus ist dieses Schalungssystem ohne zusätzliche Deckschicht in seiner Skalierbarkeit limitiert, da die Materialstärke des Furniers und damit seine Eigenspannung in Kombination mit dem für das Fügen der einzelnen Lagen nötigen Anpressdruck unmittelbaren Einfluss auf die freispannenden Bereiche – also die Distanz zwischen den Stäben – hat (siehe Kap. 5.3).

Hier kann eine zusätzliche Deckschicht beispielsweise aus eingelegten oder gebogenen Kunststoffplatten für die benötigte Auflagefläche sorgen, was die Variabilität allerdings geringfügig einschränkt.

Subtraktiv geformte Freiformschalung



Abb. 44 Subtraktiv geformte Freiformschalung

Für die Herstellung komplexer Freiformbauteile bieten subtraktiv bearbeitete, verlorene Schalungen einen Lösungsansatz. Aufgrund der geometrischen Komplexität verbleibt die Schalung nach dem Wickelprozess innerhalb des Bauteils. Somit ist das Schalungssystem – sofern es nicht aus mehreren Elementen geplant wurde – auf eine einmalige Anwendung limitiert. Um den hohen Materialeinsatz zu relativieren, kann die verlorene Schalung beispielsweise zusätzlich als Dämmmaterial fungieren.

Für die Fabrikation dieser Schalungselemente gibt es – je nach Material – zwei mögliche Strategien: (a) CNC-Fräsen und (b) Heißdrahtverfahren. Die CNC-Bearbeitung eignet sich für härtere Materialsysteme, z.B. einen Holzspan-Stärke-Komposit (Abb. 44). Aufgrund des vorgelagerten Bearbeitungsschritts resultiert bei geometrisch hoch komplexen Bauteilen ein Mehraufwand.

Die subtraktive Bearbeitung mittels Heißdrahtschneiden bietet hingegen den großen Vorteil, dass der Prozess zur Herstellung der Schalung mit denselben Maschinen durch einen Werkzeugwechsel unmittelbar in den Wickelprozess integriert werden kann. Hierfür kann das Rohbauteil auf der Rotationsachse positioniert und in die gewünschte Form gebracht werden, bevor die erzeugte Schalung im Anschluss mit Furnierholz umwickelt wird. Außerdem ist das Heißdrahtschneiden das schnellere Verfahren, da große Flächen mit einem bzw. wenigen Schnitt(en) abgetragen werden können. Für die Bearbeitung eignet sich als Trägermaterial beispielsweise Polystyrol. Trotz der hohen flächigen Druckstabilität ist bei diesem Trägermaterial nachteilig, dass sich das Holzurnier im Wickelprozess aufgrund seiner scharfen Kanten in das Material einschneidet. Daher ist hier eine zusätzliche Deckplatte notwendig.



Spantenschalung

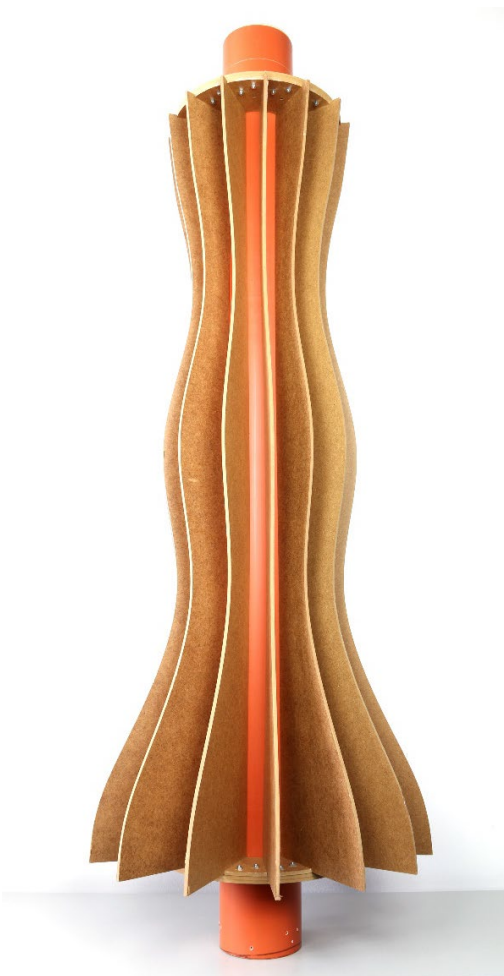


Abb. 45 Spantenschalung aus CNC-gefrästen Rippen

Durch den Einsatz CNC-gefräster Rippen, die auf ringförmigen Abstandshaltern montiert werden, lassen sich mit Hilfe einer Spantenschalung komplexe Geometrien realisieren, ohne dass die Schalung selbst im gefertigten Bauteil verbleiben muss (Abb. 45). Die sich an den Enden befin-

denden Seitenplatten bilden dabei die Aufnahme für die daran befestigten Rippenelemente und ermöglichen somit einen universellen Einsatz für verschiedene Anwendungen. Da das Furnier im Wickelprozess meist quer auf die Spanten drückt (je nach Wickelwinkel) und diese somit stark belastet, können zusätzliche Ringe zwischen den beiden Seitenplatten eingebracht werden, um die Spanten zu stabilisieren.

In Abhängigkeit der Bauteilgröße und -geometrie, sowie der Materialstärke des Furniers wird die Anzahl der Spanten und damit die Spannweite zwischen den Rippen definiert. Hieraus resultiert simultan, wie präzise die gewünschte Geometrie abgebildet wird. Die Spannweite ist entscheidend, da das Furnier stets auf zwei Rippen anliegt und diese überspannt, wodurch bei zu groß gewählten Abständen an den Auflagestellen leichte Knicke entstehen können. Dieser Umstand spielt insbesondere bei nicht rotations-symmetrischen Geometrien eine große Rolle.

Um die Schalung aus dem gewickelten Bauteil zu entfernen, werden die Ringe zunächst vom innenliegenden Wickeldorn gelöst und die Rippen im Anschluss nacheinander seitlich gedreht, sodass sie sich herausziehen lassen. Mit dieser Technik werden gleichzeitig ein wiederholter Einsatz des Schalungselements und damit ein mehrfaches Wickeln einer definierten, komplexen Geometrie möglich.

Adaptive Schalung

Adaptive Schalungssysteme bieten eine materialeffiziente Lösung für das Abbilden komplexerer Geometrien. Analog zu Stabschalungen können einzelne Stabprofile über Abstandshalter platziert werden. Durch den Einsatz elastischer Materialien in Längsrichtung bieten sie im Gegensatz hierzu jedoch den Vorteil, dass auch konvex und konkav geformte Bauteile abgebildet werden können. Ein möglicher ungleichmäßiger Anpressdruck limitiert das System jedoch und erschwert die Fabrikation freigeformter Bauteilgeometrien.



5.3 Fertigungsparameter

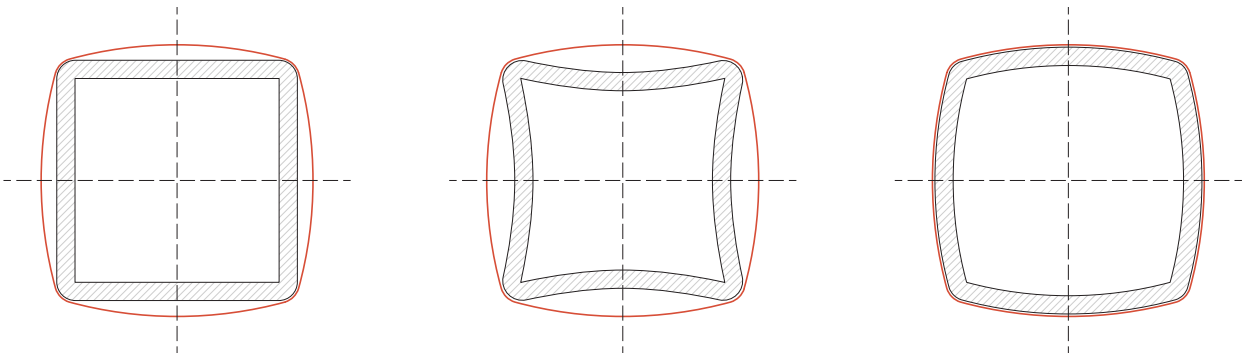


Abb. 46 Eigenspannung des Furniers bei unterschiedlichen Querschnitten

Untersuchungen der Querschnittsgeometrie

Wie in Kap. 4.3 beschrieben, neigt das Furnier aufgrund seiner Eigenspannung dazu, sich bei eckigen Profilen leicht nach außen aufzuwölben. Dasselbe gilt demnach auch für Geometrien mit einer konkaven Fläche. Umgekehrt kann sich dieses Verhalten bei konvexen Flächen zu Nutze gemacht werden, um den erforderlichen Anpressdruck für den Klebstoff bereits im Wickelprozess über die Geometrie einzubringen. So lässt sich das Furnierband bei konvexen Flächen auf Zug halten, woraus höhere Prozessgeschwindigkeiten resultieren und auf ein nachträgliches Verpressen ggf. verzichtet werden kann. (Abb. 46)

Um die Eigenspannung des Furniers und die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Geometrie bei unterschiedlichen Furnierstärken zu ermitteln, fanden hierzu großmaßstäbliche Untersuchungen statt:

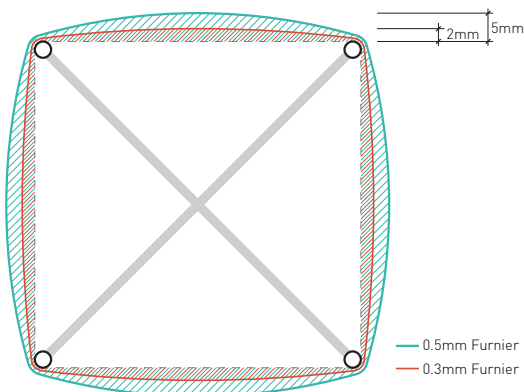


Abb. 47 Versuchsaufbau 1: Eigenspannung des Furniers in Abhängigkeit der Furnierstärke

Versuchsaufbau 1 bestand aus einer Schalung mit vier Aluminium-Rohren mit einem Durchmesser von 20mm, die in einem Quadrat von 400mm Seitenlänge positioniert und mit diagonalen Holzlatten fixiert wurden (Abb. 47).

Um das Schalungselement wurden 24mm breite Furniere mit (a) 0,3mm und (b) 0,5mm per Hand gewickelt, dabei auf Zug gehalten und mit Klebeband an der Schalung fixiert. Abb. 47 / Abb. 49 zeigen die Verformung der Furniere über die Längsfläche. Bei einem (a) 0,3mm starkem Furnier wölbte sich der Streifen um 2mm auf; das (b) 0,5mm dicke Furnier dagegen um 5mm.

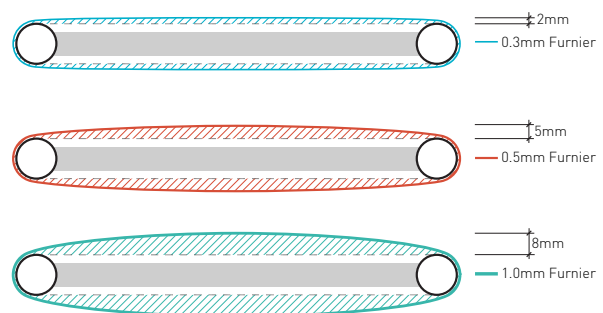


Abb. 48 Versuchsaufbau 2: Eigenspannung des Furniers in Abhängigkeit des Biegeradius und der Furnierstärke

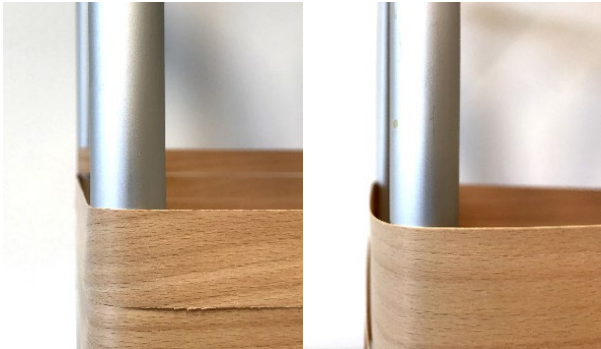


Abb. 49 Aufwölben des Furniers bei unterschiedlichen Materialstärken (10mm Biegeradius): 0,3mm (links) und 0,5mm (rechts)

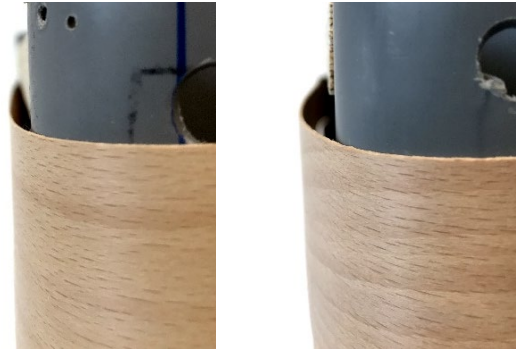


Abb. 50 Aufwölben des Furniers bei unterschiedlichen Materialstärken (25mm Biegeradius): 0,3mm (links) und 0,5mm (rechts)

Um herauszufinden, ob der Biegeradius in der Ecke eine unmittelbare Auswirkung auf das Aufwölben des Furniers hat und sich die Differenz zwischen Ist- und Soll-Geometrie bei Erhöhung des Eckradius verringert, wurde eine zweite Versuchsreihe durchgeführt. Der Versuchsaufbau hierfür bestand aus zwei PVC-Rohren mit einem Durchmesser von 50mm, die 500mm voneinander platziert und mit mehreren Holzelementen auf Abstand gehalten wurden (Abb. 48).

Um die beiden PVC-Rohre wurden mehrere 48mm breite Furnierbänder mit einer Stärke von (a) 0,3mm, (b) 0,5mm und (c) 1,0mm per Hand gewickelt. Dabei wurde eine Aufwölbung in der Mitte zwischen beiden Furnieren von (a) 2mm, (b) 5mm und (c) 8mm gemessen (Abb. 48 / Abb. 50). Aufgrund der hohen Eigenspannung des Furniers bei 1mm Stärke konnte hier neben der Aufwölbung zusätzlich eine Schrägstellung des Furnierstreifens quer zur Faserrichtung durch den Wickelwinkel und die Breite von 48mm festgestellt werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass der Biegeradius keine unmittelbare Auswirkung auf das Aufwölben des Furnierbands hat. Mit Erhöhung des Biegeradius blieb die Differenz zur Soll-Fläche sowohl bei einer Materialstärke von 0,3mm als auch bei 0,5mm unverändert.

Für den Wickelprozess bedeutet dies, dass die Materialeigenspannung im Entwurfsprozess berücksichtigt werden und die Geometrie dahingehend digital angepasst werden muss.

Neben den zuvor beschriebenen Resultaten dienten die Untersuchungen gleichzeitig dazu, die Materialstärke des Furniers für großmaßstäbliche Prototypen mit einem hohen Querschnittsumfang zu ermitteln. Simultan wurden mögliche Spannweiten des Furniers zwischen den Auflageflächen eines großmaßstäblichen Schalungssystems in Abhängigkeit der Materialstärke betrachtet. Wichtig sind diese Analysen insbesondere für den Anpressdruck des Klebstoffsystems (siehe Kap.4.3)

Die geringe Eigenspannung eines 0,3mm starken Furnierbands sorgt zwar dafür, dass die Aufwölbung im Vergleich zu anderen Materialstärken am geringsten ist, allerdings ist das Furnier in den freispannenden Bereichen über 400-500mm sehr fragil und lässt sich trotz sehr hoher Zugkraft im Wickelprozess im Folgenden problemlos um einige Millimeter verschieben. Demnach kann kein ausreichender Anpressdruck zwischen zwei Lagen aufgebracht werden.

Ein 1mm starkes Furnier weist dagegen aufgrund der höheren Eigenspannung eine größere Stabilität zwischen den Auflageflächen auf. Dennoch lässt es sich eindrücken; zudem wölbt es sich mit 8mm am stärksten auf. Für die Herstellung von 1mm dickem Furnier werden darüber hinaus zwei Furnierbänder von 0,5mm miteinander verklebt, sodass der Einsatz eines sehr starken Furniers keinen erheblichen Mehrwert für den Wickelprozess bietet – ausgenommen einer Zeitersparnis.

Für Bauteile mit einem großen Querschnitt erwies sich somit Furnier mit einer Stärke von 0,5mm am geeignetsten.



Konkaver Bauteilquerschnitt

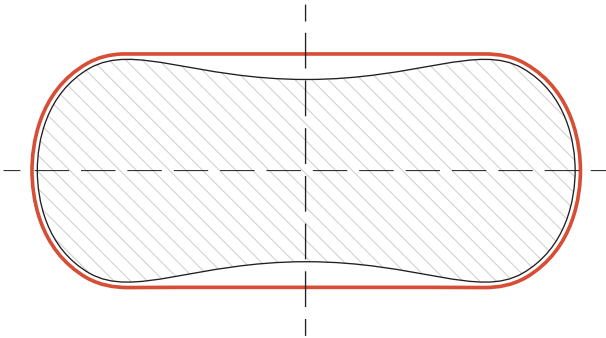


Abb. 51 Versuchsaufbau Freiformgeometrie mit konvexen und konkaven Krümmungen

Für alle anderen, konkaven Flächen, also Profile, die eine Wölbung nach innen aufweisen, ist eine hohe Anfangsfestigkeit notwendig, um ein Aufwölben des Furniers zu verhindern. Dies wirkt sich unmittelbar auf das Klebstoffsystem aus. Hierzu wurden folgende Strategien entwickelt, die zu Teilen untersucht wurden: (a) Klebstoffsystem mit hoher Anfangsfestigkeit und (b) 2-Komponenten-System bestehend aus doppelseitiger Klebeschicht und einem weiteren Klebstoff.

Für die Untersuchungen wurde eine Freiformgeometrie mit je zwei konkaven Flächen (oben/unten) und zwei konvexen Flächen (rechts/links) mit den Außenabmessungen 400 x 180mm aus XPS hergestellt (Abb. 51).

Die konkave Fläche misst an der schmalsten Stelle 150mm, daraus resultiert eine Differenz von 15mm zwischen dem Höchst- und Tiefpunkt. Um einen neutralen Untergrund zu erstellen, wurde eine erste Lage Furnierholz mit 48mm

Breite und einer Stärke von 0,5mm mit doppelseitigem Klebeband auf dem Schalungselement befestigt.

Zunächst wurde der Klebstoff Acrodur (siehe Kap. 2.2) getestet, der eine hohe Anfangsfestigkeit aufweist. Hierfür wurde Klebstoff auf die bereits gewickelte Lage aufgetragen und eine zweite mit Hilfe einer Andrückrolle gepresst. Aufgrund der Eigenspannung des Furniers löst sich die zweite Lage in den konkaven Bereichen unmittelbar nach dem Andrücken.

Für die Untersuchungen des (b) 2-Komponenten-Systems wurde ebenso Klebstoff auf die erste Lage Furnierholz aufgetragen. Die darauf zu verklebende zweite Furnierlage wurde mit 15x15mm breiten Streifen aus doppelseitigem Klebeband in 100mm Abständen vorbeschichtet und anschließend mittels Andrückrolle auf der ersten Lage angebracht. Die Tests wurden sowohl mit dem PU-Klebstoff Jowapur 686.60 als auch Acrodur durchgeführt.

Der PU-Kleber verhinderte die Haftung des Furniers auf dem doppelseitigen Klebeband. Dadurch löste sich die zweite Furnierlage in den konkaven Teilen der Form kurz nach der Pressung, sodass in diesen Bereichen keine ausreichende Verbindung der beiden Lagen hergestellt werden konnte. Die Verklebung in den konvexen Bereichen war ausreichend.

Bei Einsatz des Acrodur-Klebstoffs hielt das doppelseitige Klebeband auf der zweiten Furnierlage trotz Klebstoffauftrag. Allerdings löste sich die Lage bei der nötigen, nachträglichen Hitzeinwirkung von 180°C. Dadurch ließ sich die zweite Lage Furnier in den konkaven Bereichen mit wenig Kraft lösen; auf den konvexen Flächen der Schalung war die Verklebung nicht vollständig flächig.



6 GROßMAßSTÄBLICHE PROZESSVERSUCHE

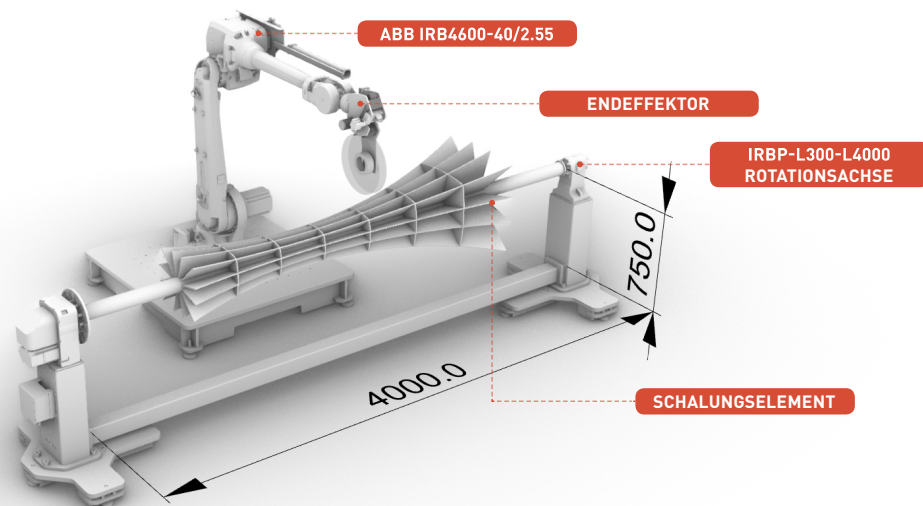


Abb. 52 Aufbau der Roboteranlage im großen Maßstab

6.1 Aufbau der Roboteranlage

Für die großmaßstäblichen Prozessversuche wurde ein ABB IRB4600-40/2.55 Roboter und einer externen ABB IRBP-L300-L4000 Drehpositioniereinheit, auf dem das Schalungselement montiert ist, verwendet (Abb. 52).

Zum Auftrag des Furniers auf dem Schalungselement wurde als Roboterwerkzeug ein spezieller Endeffektor, bestehend aus folgenden Bauteilen, entwickelt (Abb. 53): (a) Schnellwechselplatte, (b) Extrusionsrolle, (c) Schrittmotor, (d) Furnierrolle, (e) Schneidwerkzeug, (f) Filamentführung, (g) Andrückrolle, (h) Düsenleiste, (i) Klebstoff-Wanne und (j) Klebstoff-Auftragskopf.

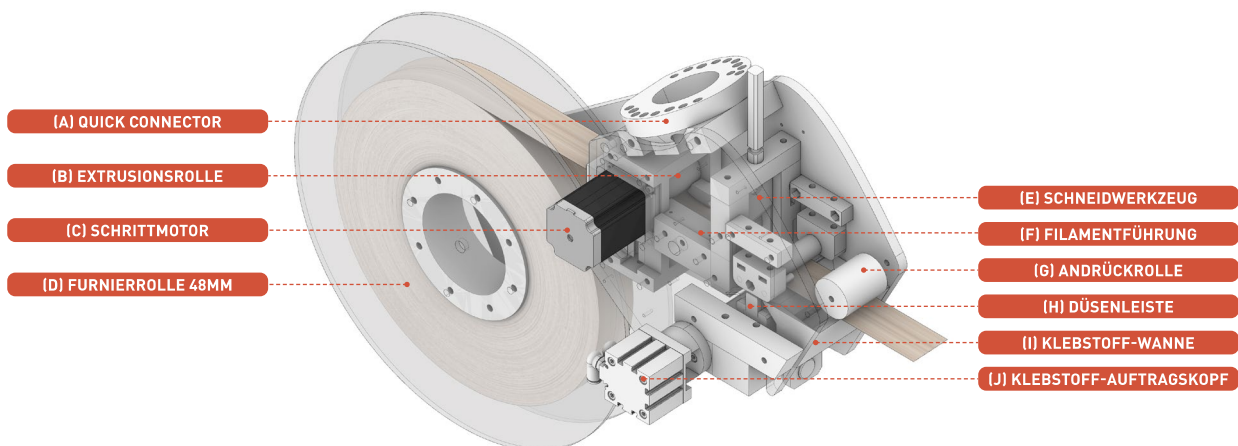


Abb. 53 Endeffektor für großmaßstäbliche Fabrikation mit 48mm breitem Furnierholz

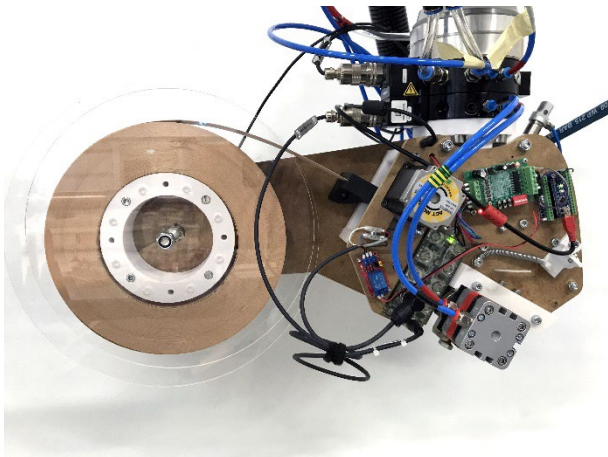


Abb. 54 Endeffektor für großmaßstäbliche Fabrikation

Dabei wird das Furnierband über eine am (d) Schrittmotor befestigte (e) Extrusionsrolle durch die (c) Filamentführung nach vorn geschoben (Abb. 53 / Abb. 54). Unterhalb der Extrusionsrolle ist eine weitere kugelgelagerte Rolle angebracht. Die beiden Rollen werden mittels Druckfedern aneinandergedrückt und üben so Druck auf das Furnier aus, sodass sich die Zugkraft über Anziehen oder Lösen der Federn präzise einstellen lassen. Mit der (g) Andrückrolle lässt sich das Furnier auftragen und das pneumatisch aktiverbare (f) Messer übernehmen den Zuschnitt des Furniers nach einer gewickelten Lage. Der (j) Auftragskopf und die (h) Düsenleiste beschichten das Furnier von unten mit einer definierten Menge Klebstoff. Die dahinterliegende (i) Wanne fängt überschüssigen Klebstoff auf.

6.2 Schalungssystem

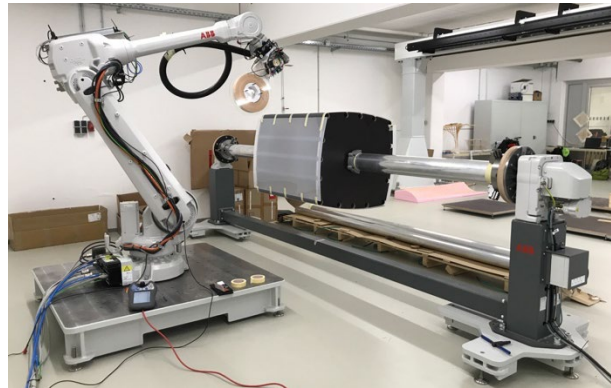


Abb. 55 Montiertes Schalungselement auf externer Rotationsachse mit Drehfutter, Aluminium-Walzenrohr und Spannringen

Für die Herstellung von großmaßstäblichen Bauteilgeometrien wurde im Zuge der Forschungsarbeiten ein Schalungssystem entwickelt, welches unterschiedliche Formen abbilden kann und somit die Grundlage für den darauffolgenden Wickelprozess schafft.

Dazu wurden Drehfutter (a) an den Enden der externen Rotationsachse befestigt, die als Aufnahme für ein Aluminium-Walzenrohr (b) mit einem Durchmesser von 150mm, 3750mm Länge und hoher Rundlaufgenauigkeit für eine hohe Präzision bilden (Abb. 55). Auf dem Hohlprofil wird das Schalungselement (c) mittels hierfür entwickelten Spannringen (d) verschraubt.



Gleichförmige Hohlprofil-Bauteile

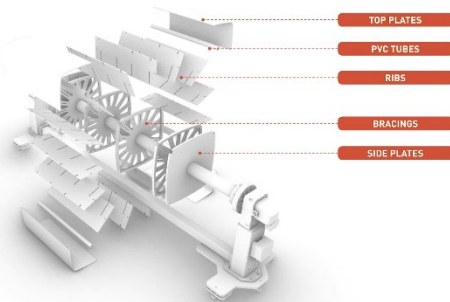


Abb. 56 Spantenschalung der Hohlprofil-Bauteile

Das entwickelte Schalungssystem für die Herstellung von gleichförmigen Hohlprofilen basiert auf einer Spantenschalung mit zusätzlicher Deckschicht und besteht aus folgenden Elementen (Abb. 56 / Abb. 57): Die Seitenplatten (a) sind am Spannring verschraubt und positionieren und sichern die Schalung gegen Verdrehen. Sie bilden die Aufnahme für die 16 Spanten (b) aus 10mm MDF, sowie PVC-Rohren (c), um den Eckradius abzubilden. Hierauf liegen 2mm Polypropylen-Platten (d), welche eine glatte und homogene Oberfläche für den späteren Wickelprozess bilden (Abb. 59).

Während des robotischen Herstellungsprozesses wird das Furnier auf der Schalung stark angepresst. Um ein Ausschalen des gewickelten Bauteils und eine Wiederverwendung der Schalung zu ermöglichen, wurde eine Zwischenschicht aus zwei Lagen Backpapier integriert.

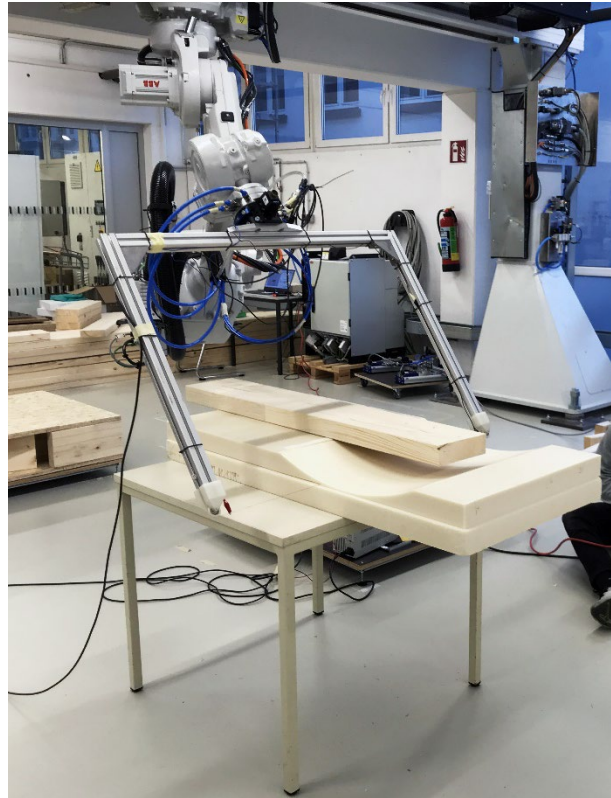


Abb. 58 Hotwire-Cutting einer Freiform-Schalung aus XPS

Alternativ zu gebogenen Platten lassen sich auch gekrümmte Deckschichten oder komplette Schalungselemente mittels Hotwire-Cutting beispielsweise aus XPS herstellen (Abb. 58) (siehe Kap. 5.2).



Abb. 57 Innere Struktur der Schalung

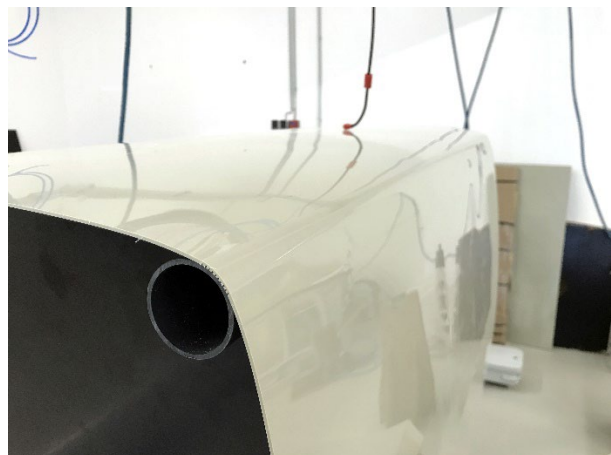


Abb. 59 Gebogene Polypropylen-Platte für eine homogene Oberfläche



Freiformbauteile

Das Schalungssystem für die entwickelten prototypischen Freiformbauteile basiert ebenfalls auf einer Spantenschalung. Hierbei werden zusätzliche Ringe zwischen den Spanten integriert, um diese auszusteiern (Abb. 60 / Abb. 61).

Spanten und Ringe können als Waffelstruktur zum Stecken ausgelegt werden; die Bauteile greifen so ineinander, sodass keine zusätzliche Verbindung zwischen den Elementen benötigt wird. Hierdurch ist – je nach Geometrie – ein späteres Ausschalen des gewickelten Bauteils bzw. Herausnehmen der innenliegenden Schalung nicht möglich. Dies gilt für alle Freiformbauteile mit konvexer und/oder konkaver Krümmung. Der innere Kern verbleibt nach dem Wickeln im Bauteil und kann dadurch Minimalanforderungen an die Standsicherheit im Brandfall gewährleisten, wodurch er gleichzeitig als verlorene Schalung sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte erfüllt. Es resultiert ein hochleistungsfähiges Tragwerk mit minimalem Materialeinsatz.

Soll die Schalung nach dem Wickelprozess entnommen werden (z.B. um weitere Bauteile mit gleicher Geometrie herzustellen), können anstelle einer Waffelstruktur mit durchgehenden Ringen einzelne Abstandshalter zwischen den Spanten eingelegt werden. Diese lassen sich nachträglich entnehmen, sodass die Spanten durch Drehen nacheinander herausgezogen werden können (siehe Kap.5.2).



Abb. 60 Spantenschalung für Freiformbauteil aus 6.5mm Multiplex



Abb. 61 Schalungssystem der Stützelemente



6.3 Bauteilgeometrie, Faserverlauf & Lagenaufbau

Freiformbauteile

Hinsichtlich der geometrischen Möglichkeiten der Herstellungstechnik wurde eine Vielzahl an unterschiedlichen Bauteilgeometrien untersucht. Insbesondere bei den Freiformbauteilen wirkt sich das Prinzip der geodätischen Linie aufgrund der komplexen Geometrie unmittelbar auf die Formgebung aus. Dabei ist der Faktor zwischen dem schmalsten und breitesten Querschnitt von besonderer Bedeutung. Wie in Kap. 3.4 beschrieben, liegen die Wickellinien in konkaven Bereichen enger beieinander; in konvexen Bereichen sind sie weiter voneinander entfernt. Je größer der breiteste Durchmesser wird, umso größer werden die Lücken zwischen den Furnierstreifen. Gleichzeitig könnten zu klein gewählte Querschnitte in Relation zum größten Bauteildurchmesser zu Überlappungen führen. Bei der Gestaltung der Bauteile ist dieses Prinzip daher zu berücksichtigen.

Abb. 62 zeigt eine Voruntersuchung im Maßstab 1:2 für unterschiedliche Querschnitte. Dabei wurden sowohl rechteckige als auch runde sowie wechselnde bzw. ineinander übergehende Querschnittsgeometrien betrachtet. Die Freiformgeometrien und ihre resultierenden Faserverläufe und -muster wurden hinsichtlich ihrer realen Anwendungsmöglichkeiten sowie ihren gestalterischen Qualitäten untersucht und miteinander verglichen und bewertet. Nach einer ersten Selektion wurden ausgewählte Entwürfe weiterhin auf ihr Tragverhalten analysiert.



Abb. 62 Variierende Querschnittsgeometrien der Stützenbauteile

Der Lagenaufbau für die Stützen erfolgte kreuzweise im und gegen den Uhrzeigersinn (Abb. 63 / Abb. 64). Darüber hinaus wurden zusätzliche vertikale Fasern in Längsrichtung integriert. Für den Schichtaufbau wurde das Muster mehrfach lagenweise wiederholt.



Abb. 63 Lagenaufbau der Stützen am 1:2 Modell

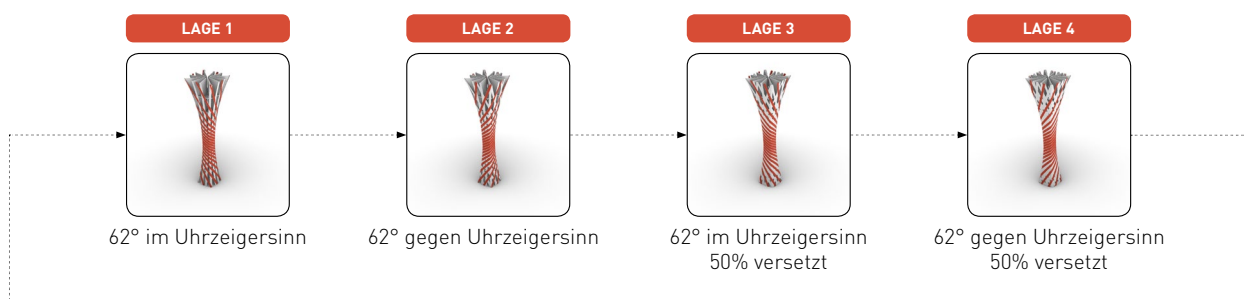


Abb. 64 Lagenaufbau Stützelemente

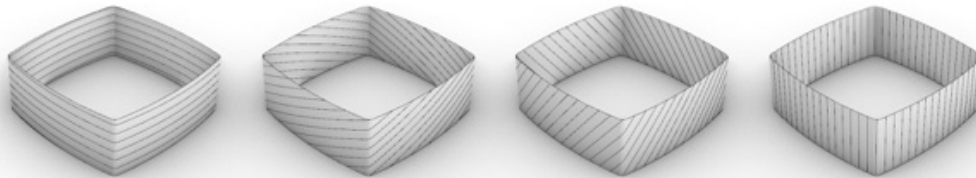


Abb. 65 Anzahl der Furnierstreifen pro Lage bei einem Winkel von (links nach rechts): 1° / 1 Streifen, 23° / 24 Streifen, 52° / 48 Streifen, 90° / 62 Streifen

Gleichförmige Hohlprofil-Bauteile

Da das Furnier wie zuvor beschrieben aufgrund seiner Eigenspannung dazu neigt, sich aufzuwölben, wurde die Geometrie für gleichförmige Hohlprofil-Module leicht angepasst. Mithilfe einer leichten konvexen Krümmung konnte der erforderliche Anpressdruck für den Klebstoff unmittelbar im Wickelprozess aufgebracht und Delamierungen somit verhindert werden (Abb. 65).

Dies wirkte sich unmittelbar auf die Herstellungsstrategie und die zu erzeugenden Werkzeugpfade aus. Infolge der konvexen Bauteilgeometrie konnte das Furnierband auf Zug gehalten werden, sodass der Roboterarm einen linearen Pfad parallel zur externen Rotationsachse abfahren konnte. So wurden die normalerweise komplexen Bewegungen für rechteckige Profile vollständig eliminiert. Folglich konnte die TCP-Geschwindigkeit des Roboters deutlich erhöht werden, wodurch sich der gesamte Herstellungsprozess erheblich beschleunigt.

Zum Faserverlauf und Lagenaufbau fanden strukturelle Voruntersuchungen statt (Kap. 2.3), in denen der Einfluss der Ausrichtung des Furniers auf die mechanischen Eigenschaften des Materialsystems untersucht wurde. Die Ausrichtung und mit ihr die Anzahl der Furnierstreifen pro Lage

beeinflusst unmittelbar den robotischen Herstellungsprozess (Abb. 66). Je steiler der Winkel des Filaments desto größer ist die Anzahl der an der Schalung zu fixierenden Furnierbänder, was wiederum deutliche Auswirkungen auf die Fertigungsdauer mit sich bringt: Bei einer Ausrichtung von 1° wird lediglich ein Furnierstreifen pro Lage gewickelt; bei 90° sind es bereits 62. Zusätzlich erhöht sich die Länge der Werkzeugpfade und das Furnier wird in Faserrichtung stärker gebogen je steiler der Wickelwinkel ist.

Der Lagenaufbau besteht aufgrund dessen aus horizontal ausgerichteten Fasern mit je einem Furnierband pro Lage. Um Schwachstellen an den Klebefugen zu vermeiden, wurden die einzelnen 48mm breiten Lagen jeweils um 24mm zueinander versetzt (Kap. 2.3). Dadurch konnte gleichzeitig immer die oberste Furnierlage am Schalungselement mit Klemmen befestigt und diese nach der darauffolgenden gewickelten Lage wieder entfernt werden. Insgesamt wurden 12 Lagen mit einer Stärke von 0,5mm gewickelt und verklebt, sodass eine Wandstärke von 6mm resultiert.

Zur Überprüfung der Herstellungstechnik und Bauteilpräzision wurden erste vollmaßstäbliche Prototypen robotisch gefertigt und analysiert (Abb. 67 / Abb. 68).

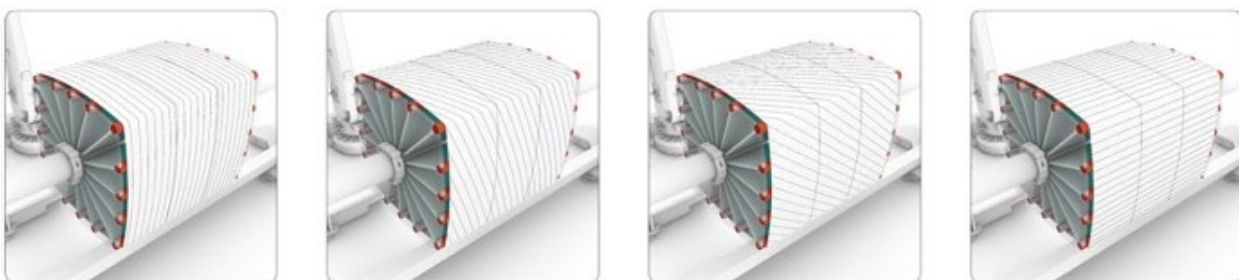


Abb. 66 Unterschiedliche Faserverläufe bei Fabrikation der Deckenmodule

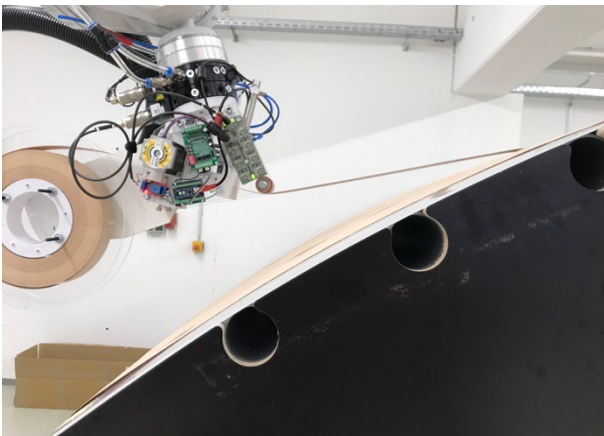
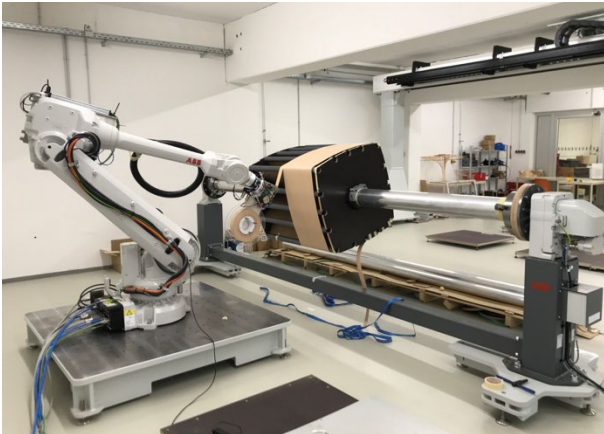


Abb. 67 Fabrikationsprozess Deckenmodule

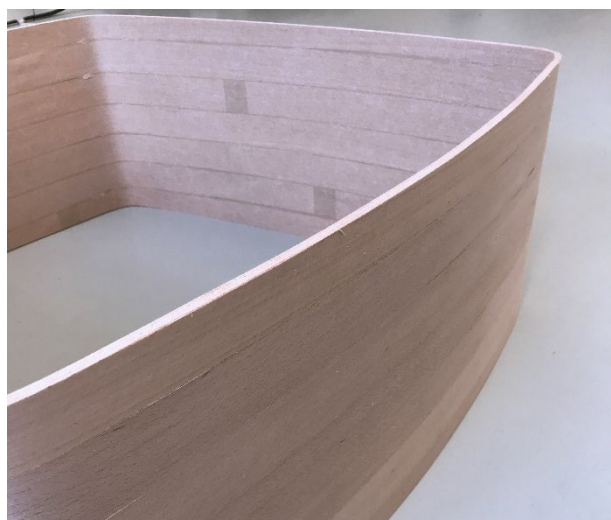
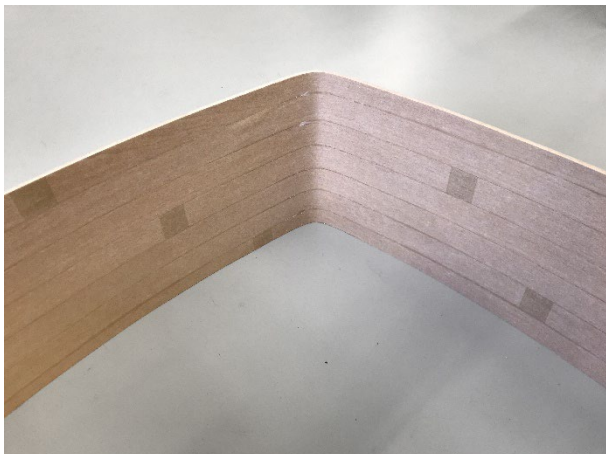


Abb. 68 Prototyp eines Deckenmoduls



6.4 Klebstoffapplikation und -dosierung

Dosieranlage



Abb. 69 Dosieranlage HYDROTOP 1D150M mit Klebstofffass

Zum Dosieren des Klebstoffs kommt die Dosieranlage HYDROTOP 1D150M der Firma OEST GmbH & Co. Maschinenbau KG zum Einsatz, die für die Forschungsarbeiten übernommen wurde. Sie besteht aus einem (1) Fassanschluss mit Silikatgelfilter, (2) Kontrollgefäß, (3) pneumatischer Hochdruck Dosierpumpe mit manueller Einstellung der Austragsmenge, (4) Dosierleitung (max. 10 m), (5) Klebstoff Auftragskopf FACETAC P80, sowie (6) einer Pneumatiksteuerung (Abb. 69).

Klebstoff-Auftragskopf

Der Auftragskopf selbst wurde in das entwickelte Auftragstool integriert und lag während der Beleimung am Holzfurnier an (Abb. 70 / Abb. 71). Das Furnier wurde hierfür über die Anlauffläche des Auftragskopfes geführt und mit zwei Anpressrollen gegen die Düsenleiste gedrückt. Der Klebstoff trat nach der Anlauffläche aus und formte die resultierenden Klebstoffspuren. Um das Auftragswerkzeug – insbesondere die gelagerten Rollen – vor abtropfendem und später aushärtendem Klebstoff in diesem Bereich zu schützen, wurde eine kleine Wanne hinter den Auftragskopf integriert, die den überschüssigen Klebstoff auffing.

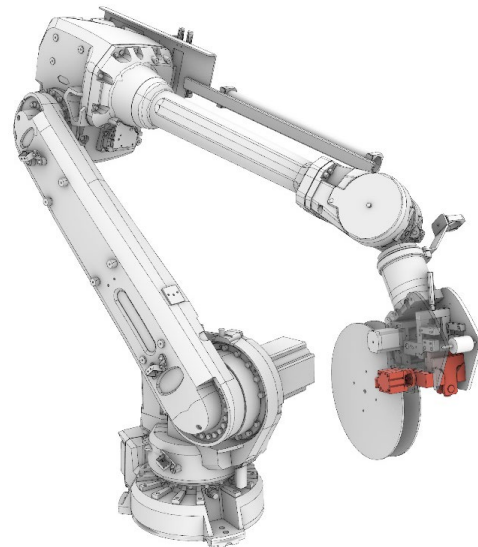


Abb. 70 Roboter mit Endeffektor und Klebstoff-Auftragskopf

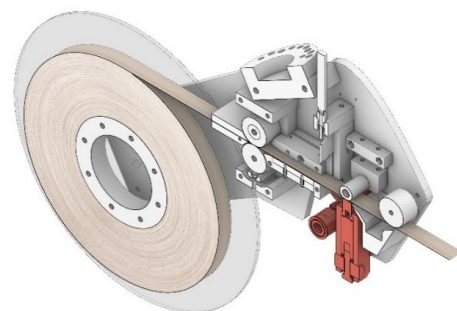


Abb. 71 Perspektivische Schnittdarstellung Endeffektor mit integriertem Klebstoff-Auftragskopf FACETAC P80



Durchlaufmenge und Extrusionsgeschwindigkeit

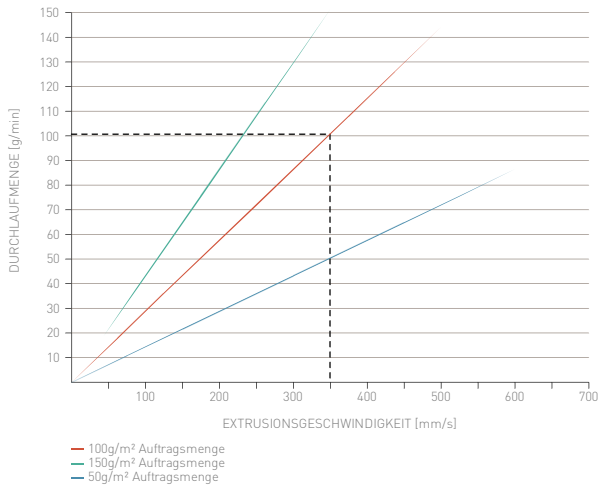


Abb. 72 Durchlaufmenge in Abhängigkeit zur Extrusionsgeschwindigkeit

Für einen automatisierten Klebstoffauftrag müssen die Auftragsmenge (g/m^2), der Betriebsdruck der Dosieranlage und daraus resultierend die Durchlaufmenge pro Minute, sowie die Extrusionsgeschwindigkeit des Furniers ermittelt und aufeinander abgestimmt werden.

Die Auftragsmenge ist vom jeweiligen Klebstoff abhängig. Aus der Furnierbreite lässt sich die Klebstoffmenge pro Meter ermitteln: Bei einer mittleren Auftragsmenge von $100\text{g}/\text{m}^2$ und einer Furnierbreite von 48mm ergibt sich eine Klebstoffmenge von $4,8\text{g}/\text{m}$. Je nach Extrusionsgeschwindigkeit des Furniers resultieren unterschiedliche Durchlaufmengen pro Minute (Abb. 72). Bei einer Geschwindigkeit des Roboters von $250\text{mm}/\text{s}$ ergibt sich eine Austrittsmenge von $72\text{g}/\text{min}$, bei $350\text{mm}/\text{s}$ sind es bereits $100\text{g}/\text{min}$.

Je nach gewünschter Auftragsmenge lässt sich die Extrusionsgeschwindigkeit auf die Durchlaufmenge anpassen – und umgekehrt. Hierfür wird zunächst die gewünschte Auftragsmenge definiert und der Betriebsdruck mit der Extrusionsgeschwindigkeit aufeinander abgestimmt.

Der Betriebsdruck der Dosieranlage stellt dabei die entscheidende Komponente für die Durchlaufmenge dar. Dieser setzt sich zusammen aus dem Durchmesser der Kapillaren, durch die der Klebstoff austritt und der Klebstoffleitung. Insbesondere bei faserverstärkten Klebstoffen darf der Kapillarendurchmesser einen Wert von $0,8\text{mm}$ nicht unterschreiten, um die Bohrungen nicht zu verstopfen.

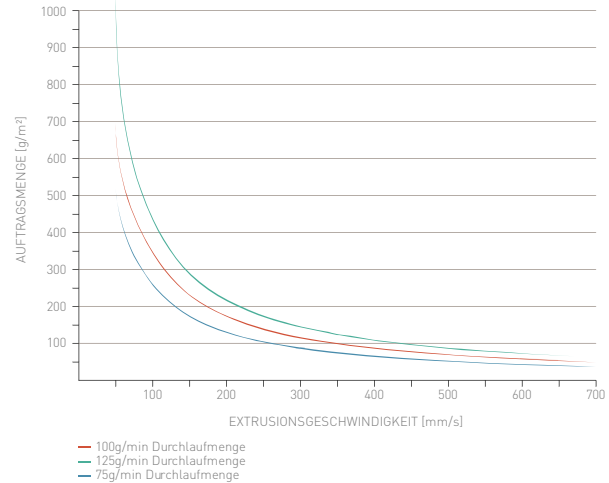


Abb. 73 Auftragsmenge in Abhängigkeit zur Extrusionsgeschwindigkeit

Die Abb. 73 / Abb. 74 zeigen Auftragsmengen in Abhängigkeit zur Extrusionsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Durchlaufmengen. Soll die Auftragsmenge $100\text{g}/\text{m}^2$ betragen, können Betriebsdruck und Extrusionsgeschwindigkeit entweder niedrig gehalten werden oder die Durchlaufmenge wird durch Regulierung des Drucks erhöht, um höhere Vorschubgeschwindigkeiten und somit schnellere Fertigungszeiten zu ermöglichen. Sehr hohe Auftragsmengen erfordern langsame Prozessgeschwindigkeiten, sehr geringe Auftragsmengen hingegen extrem hohe Vorschubgeschwindigkeiten.

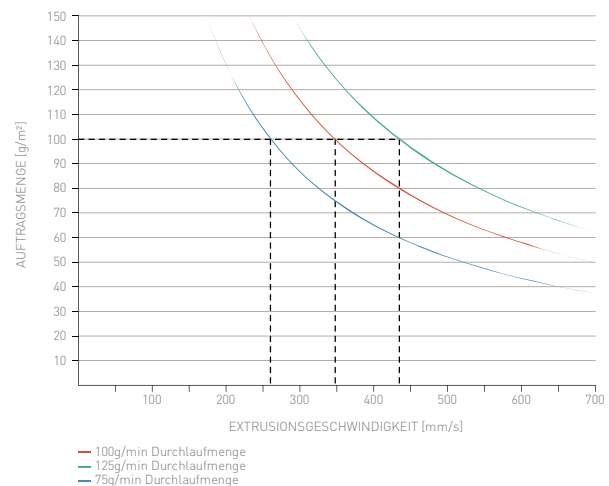


Abb. 74 Auftragsmenge in Abhängigkeit zur Extrusionsgeschwindigkeit



Um den Klebstoffauftrag automatisiert in den Prozess zu integrieren, ist aufgrund der sehr geringen Klebstoffauftragsmenge eine hohe Vorschubgeschwindigkeit notwendig. Gängige industriefähige Applikationssysteme arbeiten mit einer Vorschubgeschwindigkeit von mind. 1300mm/s. Damit die Dosierpumpe anspringt, darf der Dosierregler einen definierten Richtwert nicht unterschreiten. Hierfür ist ein Mindestdruck von 10-15 bar notwendig.

Ausschlaggebend für die Prozessgeschwindigkeiten ist u.a. die Komplexität der Bewegungen und der Fahrweg des Roboters. Die Bewegungen werden insbesondere maßgebend durch die Bauteilgeometrie und die Wickelrichtung beeinflusst (siehe Kap. 6.3).

Bei Wickelungen um 90° zur Rotationsachse sind sehr hohe Extrusionsgeschwindigkeiten möglich, da sich die Rotationsachse sehr schnell drehen kann, während sich der Roboter langsam parallel entlang der Achse bewegt. Die Extrusionsgeschwindigkeit des Furniers wird hierbei fast ausschließlich von der Rotationsgeschwindigkeit der Drehpositioniereinheit bestimmt. Ist das Furnier dagegen z.B. um 45° oder gar parallel zur Rotationsachse ausgerichtet, dreht sich die Achse weniger bis gar nicht. Somit ist die TCP-Geschwindigkeit des Roboters verantwortlich für die Extrusionsgeschwindigkeit.

Neben dem Wickelwinkel ist aber auch der Umfang des Bauteils entscheidend. Je größer der Umfang desto schneller wird das Furnier bei gleichbleibender Rotationsgeschwindigkeit extrudiert. Bauteile mit einem sehr geringen Querschnitt bedingen damit höhere Rotationsgeschwindigkeiten.

Die Integration eines geeigneten Klebstoffsystems stellte daher insbesondere während der Testphase, in der die Roboteranlage mit eher geringen Vorschüben bzw. Extrusionsgeschwindigkeiten gefahren wird, hohe Anforderungen an den gesamten Prozess.

Experimentelle Untersuchungen der Durchlaufmenge

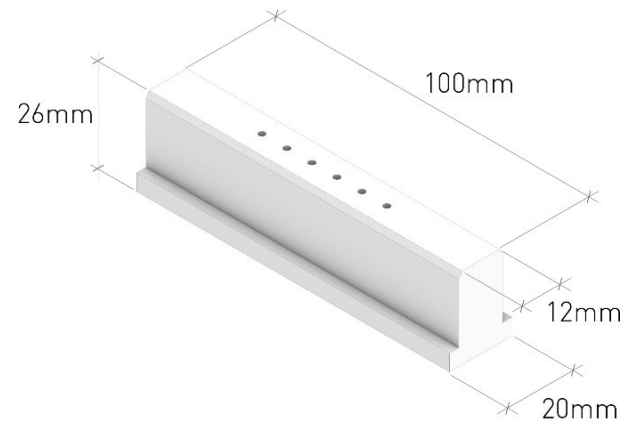


Abb. 75 Düsenleiste mit 6 Bohrungen

Für eine gleichmäßige Verteilung des Klebstoffs auf dem Furnier sorgt die Düsenleiste. Das T-förmige Bauteil besteht aus Teflon und wird über eine Feststellschraube am Auftragskopf oberhalb einer Austrittsbohrung befestigt. Der Klebstoff gelangt aus der Austrittsbohrung in ein Langloch der Düsenleiste und wird hier über mehrere trichterförmig zulaufende Bohrungen gleichmäßig verteilt (Abb. 75).

Um eine flächige Verklebung der einzelnen Furnierlagen zu gewährleisten, müssen die Bohrungen in der Düsenleiste entsprechend dimensioniert und angeordnet werden. Hierzu fanden im Rahmen der Forschungsarbeiten mehrere Versuchsreihen statt:

In Versuch 1 wurde zunächst eine Düsenleiste mit 6 Bohrungen à 1,0mm untersucht. Aufgrund des faserhaltigen Klebstoffs konnte hiermit kein gleichmäßiger Durchfluss erzielt werden. Der Klebstoff floss unregelmäßig und einzelne Bohrungen verstopften zum Teil.

Für Versuch 2 wurden die Bohrungen daher auf 2,0mm aufgebohrt. In den folgenden Untersuchungen mit dieser Düsenleiste wurde der Betriebsdruck zwischen 30 und 60bar variiert und jeweils mehrere Messungen der Durchlaufmenge durchgeführt. Der Klebstoffdurchfluss war bei allen Tests konstant.

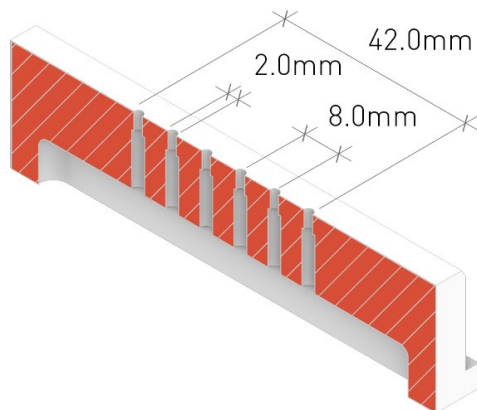


Abb. 76 Schnittdarstellung der Düsenleiste mit 6 Bohrungen

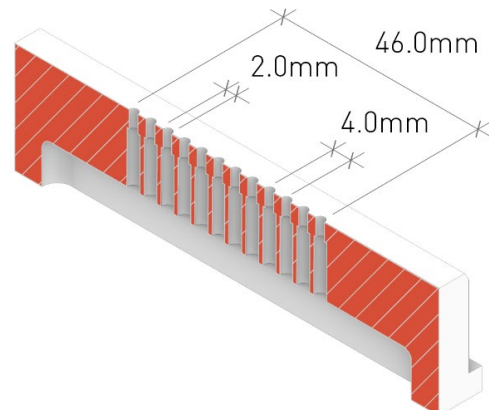


Abb. 78 Schnittdarstellung der Düsenleiste mit 12 Bohrungen

Um den Abstand zwischen dem Klebstoffaustritt zu verringern und den Einfluss der Anzahl der Bohrungen auf die resultierende Durchlaufmenge zu untersuchen, wurden weitere Düsenleisten mit 9 Bohrungen à 1,5mm und 12 Bohrungen à 2,0mm (Abb. 78) gefertigt. Auch hier wurden jeweils Messungen mit unterschiedlichem Betriebsdruck durchgeführt und ausgewertet (Abb. 77). Bei allen Durchläufen floss der Klebstoff gleichmäßig durch die Bohrungen. Die Untersuchungen zeigten, dass eine höhere Anzahl an Bohrungen bei gleichem Betriebsdruck zu einer geringeren Durchlaufmenge führt.

Darüber hinaus sollte eine weitere Versuchsreihe zeigen, inwiefern sich die Größe des Bohrungsdurchmessers bei gleichbleibender Anzahl der Bohrungen auf die Durchlaufmenge auswirkt. Hierfür wurden zwei Düsenleisten mit jeweils 9 Bohrungen mit einem Durchmesser von 1,5mm und 3,0mm miteinander verglichen. Auch hier war der Klebstoffdurchfluss bei beiden untersuchten Leisten homogen. Entgegen der Annahme, dass ein größerer Bohrungsdurchmesser bei gleichem Betriebsdruck eine höhere Durchlaufmenge bewirkt, zeigten die Untersuchungen, dass der Klebstoffaustritt nahezu gleich blieb (Abb. 79).

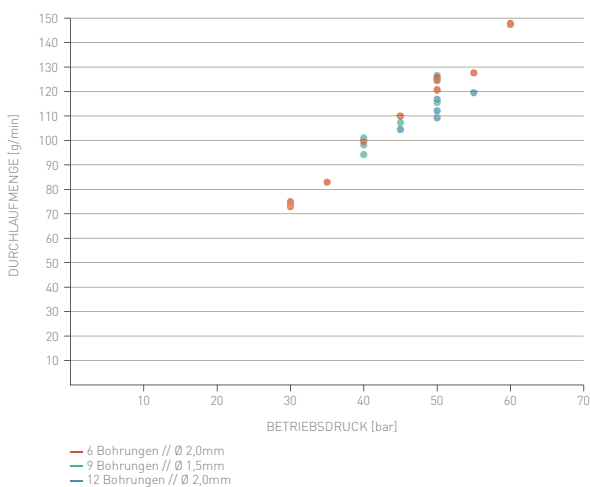


Abb. 77 Experimentelle Untersuchungen der Durchlaufmenge bei unterschiedlichem Betriebsdruck mit verschiedenen Düsenleisten

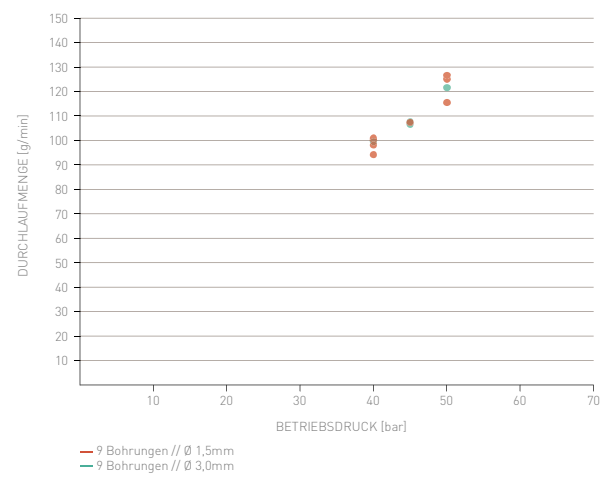


Abb. 79 Experimentelle Untersuchungen der Durchlaufmenge bei unterschiedlichen Bohrungsdurchmessern



Experimentelle Untersuchungen des Klebstoffauftrags



Abb. 80 Experimentelle Untersuchungen des Klebstoffauftrags

Um die Verteilung des Klebstoffs auf dem Furnier näher zu untersuchen, fanden mehrere Tests an einem großmaßstäblichen Bauteil statt. Hierfür wurde die zuvor beschriebene Schalung für Hohlprofil-Module verwendet, auf der zunächst eine Lage Furnier mit 48mm Breite gewickelt wurde. Anschließend wurden jeweils drei volle Umdrehungen mit einer resultierenden Gesamtbreite von 150mm mit den verschiedenen Düsenleisten bei unterschiedlichen Betriebsdrücken aufgetragen. Das Furnier wurde in den Untersuchungen stets auf Zug gehalten und wirkte so mit einem entsprechenden Druck auf die Schalung. Die Extrusionsgeschwindigkeit betrug in allen Tests 350mm/s. Nach dem Wickelprozess wurde das verklebte Furnierband ca. 1min auf der Schalung gelassen und dann abgezogen (Abb. 80 / Abb. 81).

In Versuchsreihe 1 wurde zunächst die Düsenleiste mit 6 Bohrungen à 2,0mm getestet. Bei einem Betriebsdruck von 40bar und einer resultierenden Durchlaufmenge von ca. 100g/min konnten bereits gute Ergebnisse erzielt werden (Abb. 80 / Abb. 81). Der Abstand zwischen den Klebstoffspuren könnte im späteren Bauteil jedoch zu stellenweisen Delamierungen führen.

Mit der schrittweisen Erhöhung des Betriebsdrucks auf 45, 50 und 55bar und damit verbunden einer höheren Klebstoffmenge konnten keine besseren Resultate erzielt werden. Dies zeigt, dass die Klebstoffmenge und der Betriebsdruck ausreichend hoch definiert wurden, der Abstand zwischen den Bohrungen der Düsenleiste jedoch zu groß ist, um eine flächige Verteilung des Klebstoffs zu erzielen.

In Folge wurde die Anzahl der Bohrungen in Versuchsreihe 2 auf 9 erhöht und der Durchmesser auf 1,5mm reduziert. Der verringerte Abstand zwischen den Bohrungen erzielte bessere Resultate hinsichtlich der Klebstoffverteilung im Vergleich zur Düsenleiste mit 6 Bohrungen. Dennoch ergaben sich bei allen getesteten Betriebsdrücken (40-50bar) kleine Lücken zwischen den Klebstoffriefen, die keine flächige Verklebung gewährleisten.

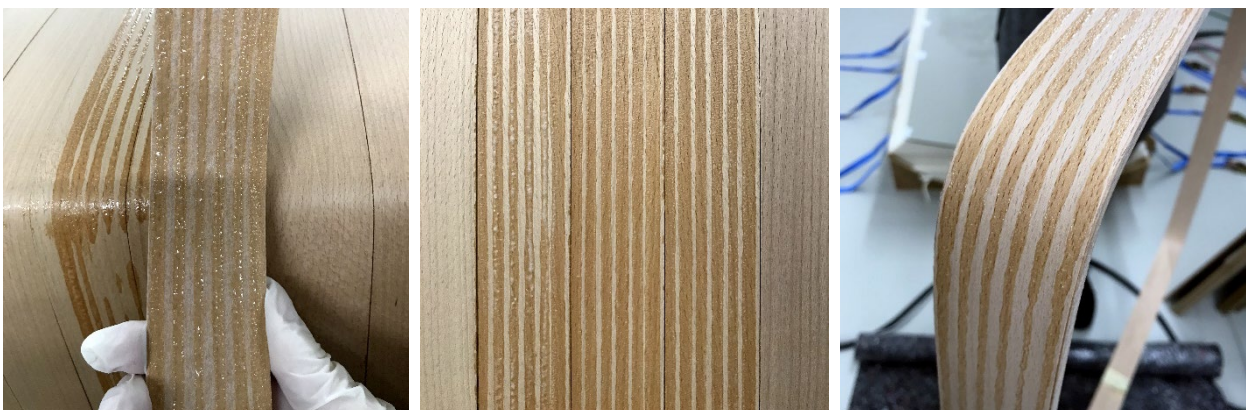


Abb. 81 Versuchsreihe 1: Klebstoffauftrag mit 6 Bohrungen à 2,0mm



Abb. 82 Homogene Klebstoffverteilung auf dem Furnierband

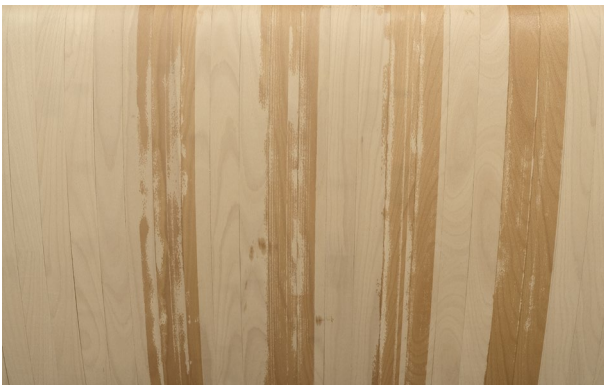


Abb. 83 Optimierung des Anpressdrucks und der Klebstoffverteilung durch Erhöhung der Zugkraft

Mit der Erhöhung auf 12 Bohrungen à 2,0mm in Versuchsreihe 3 konnten die Lücken vollständig geschlossen werden. Die Untersuchungen zeigten, dass der Klebstoff durch Verringerung der Abstände zwischen den Austrittsbohrungen homogen auf dem Furnierband verteilt werden konnte (Abb. 82 / Abb. 83).

Gleichzeitig wurde deutlich, dass der Anpressdruck - insbesondere in den Bereichen der Schalung mit geringer Krümmung - nicht ausreicht, um die Lagen miteinander zu verpressen. In den Eckbereichen ist die Druckkraft am höchsten – hier sorgt der hohe Anpressdruck außerdem für eine homogene Verteilung des Klebstoffs (Abb. 84). Daher wurden simultan zu den beschriebenen Versuchsreihen zwei Druckfedern in den Endeffektor integriert, die einen hohen Druck auf beide Extrusionsrollen ausüben und das Furnier somit auf Zug halten (Kap. 6.1).

Mit Hilfe der Druckfedern ließ sich eine definierte Zugkraft einstellen, um für einen ausreichenden Anpressdruck für die Verklebung im Wickelprozess zu sorgen. Hierdurch konnte in Kombination mit der Anpassung der Düsenleiste ebenso eine homogene Klebstoffverteilung auf der gesamten Fläche erzielt werden.

In Folge des hohen Anpressdrucks trat eine geringfügige Klebstoffmenge aus den Fugen zwischen dem Furnier aus und schäumte bei Aushärten auf (Abb. 85). Insbesondere in den Eckbereichen, in denen der Druck am höchsten ist, durchdrang der Klebstoff stellenweise das Furnier, was allerdings keine ungewollten Spuren hinterließ.

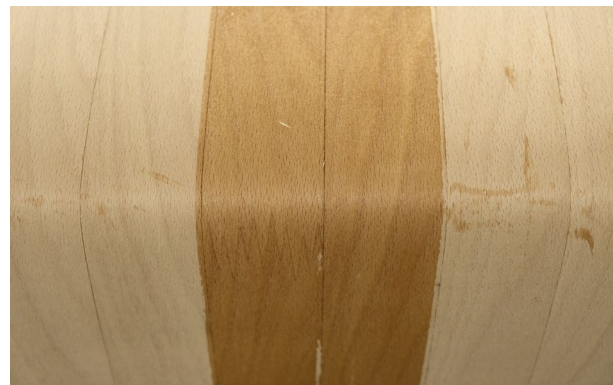


Abb. 84 Homogene Klebstoffverteilung in den Eckbereichen



Abb. 85 Klebstoffaustritt zwischen den Fugen in den Eckbereichen

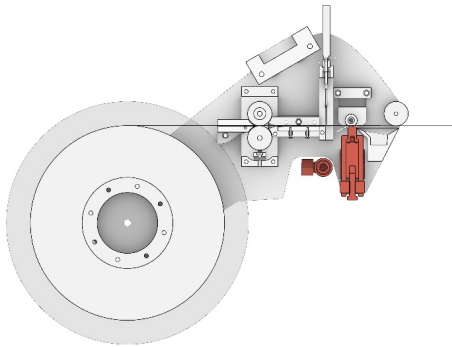


Abb. 86 Schnittdarstellung Endeffektor mit integriertem Klebstoff-Auftragskopf FACETAC P80

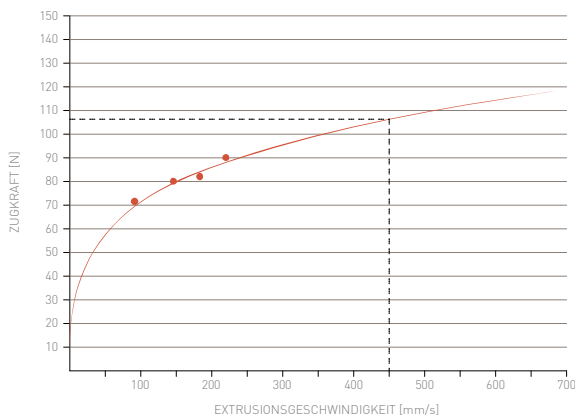


Abb. 87 Resultierende Zugkraft (N) in Abhängigkeit der Extrusionsgeschwindigkeit (mm/s)

Um die resultierende Zugkraft für den erforderlichen Anpressdruck zu ermitteln, fanden Messungen mit einem Zugmessgerät statt. Hierfür wurde zunächst digital ein linearer Werkzeugpfad generiert, die der Roboterarm mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten abfuhr. Die dafür gewählten TCP-Geschwindigkeiten betragen zwischen 100 und 250mm/s.

Die Messungen zeigten, dass sich die Zugkraft in Abhängigkeit der TCP-Geschwindigkeit verändert. Aus den Messergebnissen wurde ein Graph abgeleitet, um die jeweilige Zugkraft bei einer definierten Extrusionsgeschwindigkeit zu ermitteln (Abb. 87). Bei einer Extrusionsgeschwindigkeit von 450mm/s, wie bei der Herstellung der Prototypen gewählt, ergibt sich demnach eine resultierende Zugkraft von über 105N.

Automatisierte Ansteuerung des Klebstoff-Auftrags

Die automatisierte Ansteuerung der Klebstoffapplikation erfolgte bei den nachfolgend entstandenen prototypischen Bauteilen mittels pneumatisch angesteuerter IO-Signale. Da der Betriebsdruck der Dosieranlage mit einem bestimmten Wert manuell eingestellt und somit während des Prozesses nicht verändert wird, ist der Klebstoff-Durchlauf in Abhängigkeit der Einstellung stets konstant. Infolge einer konstanten Durchlaufmenge muss demnach auch die Auftragsgeschwindigkeit während der Applikation unverändert bleiben, um eine gleichbleibende Klebstoffmenge auf dem Furnier zu gewährleisten.

Um ein Auftragen des Klebstoffs auf die Schalung zu vermeiden und somit zu verhindern, dass sich das gewickelte Bauteil nicht mehr ausschalen lässt, wurde das Signal für den Start und Stopp des Auftrags zeitlich versetzt. Gleichzeitig mussten die Extrusions- und Rotationsgeschwindigkeiten für die Anfangs- und Endziele aufgrund der hohen Prozessgeschwindigkeiten gedrosselt werden, damit keine ruckartigen Bewegungen von Roboterarm und Rotationsachse entstehen und das fixierte Furnierband infolgedessen reißt. Das Signal zum Start bzw. Stopp des Auftrags wurde – im Falle der Hohlprofil-Bauteile – nach einer halben Umdrehung bzw. einer halben Umdrehung vor Ende gesetzt. Somit konnte eine linear ansteigende Beschleunigung bei Beginn sowie ein Abbremsen am Ende des Prozesses integriert werden, ohne dass dabei eine erhöhte, inhomogene Klebstoffmenge aus dem Auftragskopf aufgetragen wird.

Zusätzlich wurde eine Safety-Routine für den Prozess geschrieben, um zu verhindern, dass Klebstoff weiterhin austritt, wenn der automatisierte Wickelprozess unterbrochen wurde. Diese Routine lief im Hintergrund und hat kontinuierlich den Status (an oder aus) der beiden Eingangssignale für den Klebstoffauftrag überprüft. Simultan wurde überprüft, ob eine Bewegung von Roboterarm und Rotationsachse stattfindet. Je nach Zustand, wurde ein Signal zum Ausschalten des Klebstoffauftrags gesendet, sollte der Prozess unterbrochen worden sein. Umgekehrt wurde automatisch ein Signal zum Anschalten des Klebstoffauftrags gesendet, sobald der Prozess wieder gestartet wurde.



6.5 Prototyping

Die robotische Fabrikation der gleichförmigen Hohlprofil-Bauteilen beinhaltet folgende Prozessschritte (Abb. 88):

1. Robotischer Wickelprozess
2. Automatisierte Trennschnittmarkierung
3. Demontage des Wickeldorns
4. Ausschalen des gewickelten Bauteils
5. Montage und Ausrichtung des Wickeldorns

Nach diesen Prozessschritten wurden die gewickelten Bauteile auf der Kreissäge auseinander gesägt.

Die nachfolgende Bilderreihe (Abb. 89 - Abb. 105) zeigt Eindrücke und Detailaufnahmen der robotischen Fabrikation der verschiedenen Prototypen, sowie der fertig produzierten Bauteile.

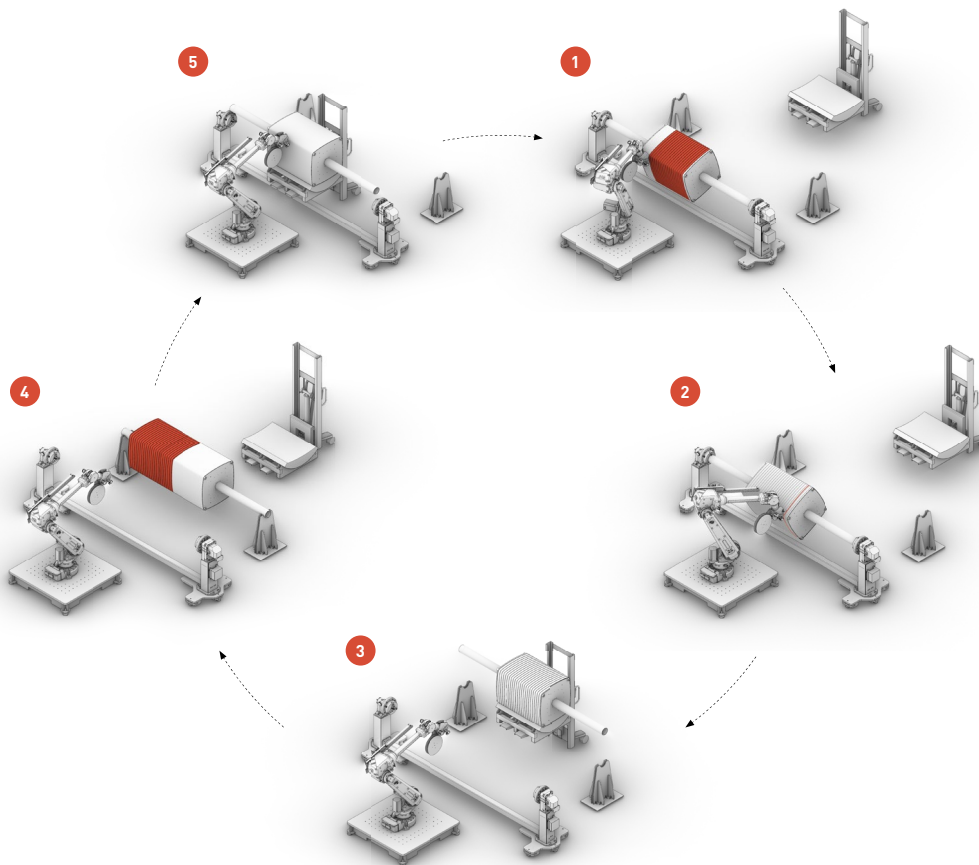


Abb. 88 Herstellungsprozess der Deckenmodule: 1. Robotischer Wickelprozess, 2. Automatisierte Trennschnittmarkierung, 3. Demontage des Wickeldorns, 4. Ausschalen des gewickelten Bauteils, 5. Montage und Ausrichtung des Wickeldorns



Abb. 89 Roboteranlage mit Schalungselement der Deckenmodule



Abb. 93 Programmierung und Ansteuerung via Robot Components

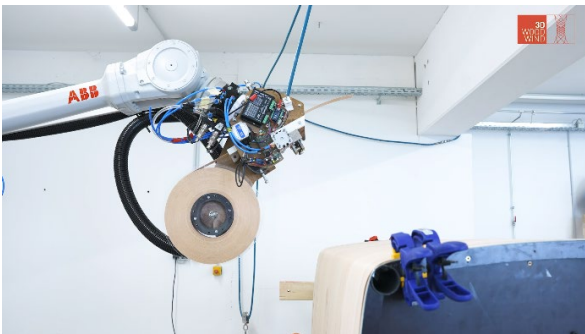


Abb. 90 Endeffektor mit 200m Furnierrolle

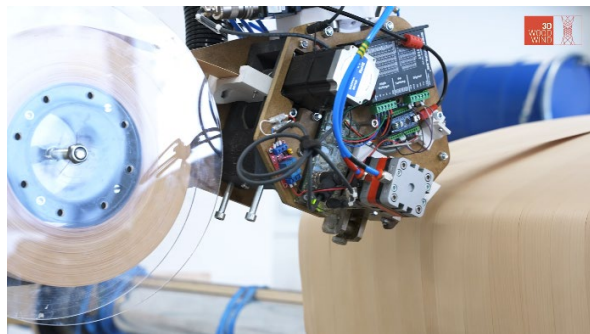


Abb. 94 Präziser robotischer Auftrag des Furniers mittels Endeffektor

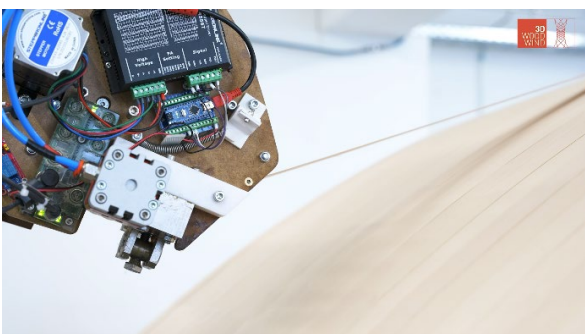


Abb. 91 Furnierband unter Zugspannung

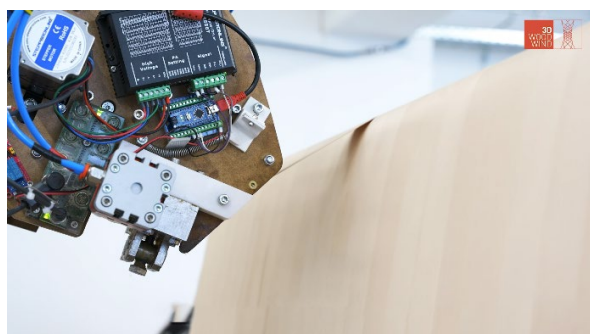


Abb. 95 Rotation des Schalungselements



Abb. 92 Automatisierte Klebstoffapplikation mittels Auftragskopf



Abb. 96 Verleimung des Furniers von der Unterseite



Abb. 97 Zusammenbau des Schalungselements für die Stützenbauteile

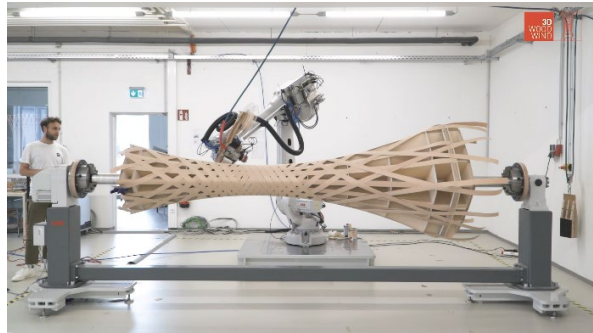


Abb. 101 Robotischer Fertigungsprozess Stützenbauteile

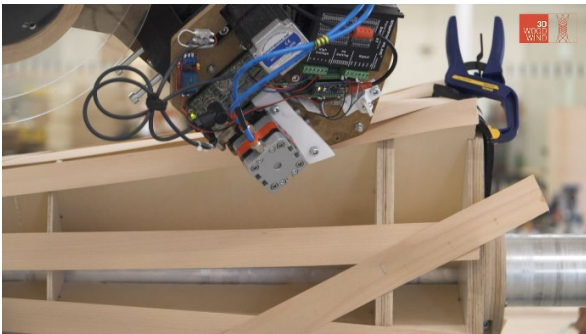


Abb. 98 Befestigung des Furniers mittels Klemme



Abb. 102 Befestigung des Furniers mittels Tacker

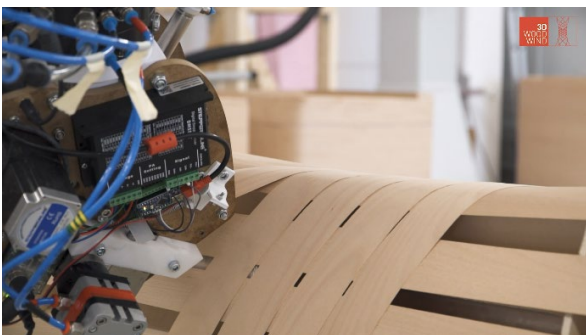


Abb. 99 1. Lage im Uhrzeigersinn



Abb. 103 Kreuzweise gewickelte Lage gegen den Uhrzeigersinn

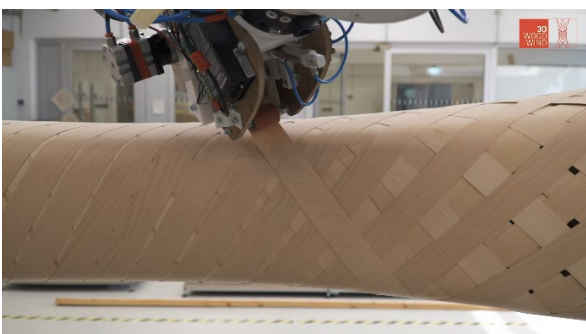


Abb. 100 Materialverdichtung im mittleren Teil der Stütze



Abb. 104 Resultierendes Wickelmuster

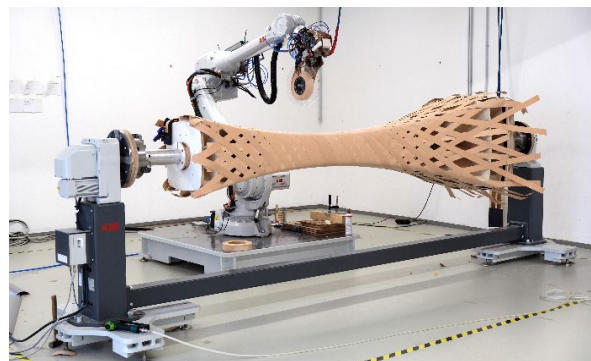
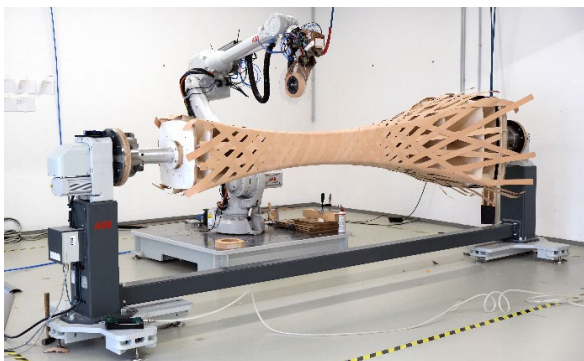
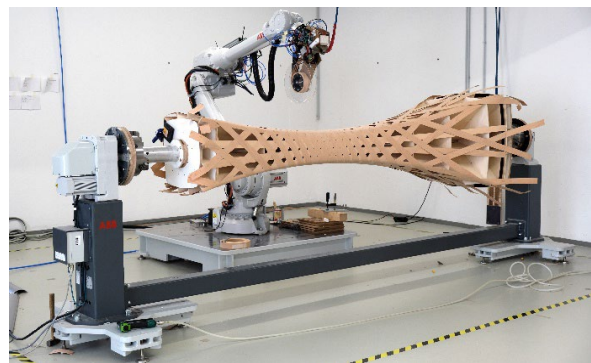
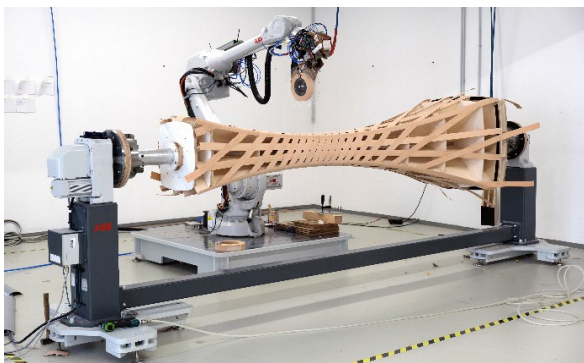
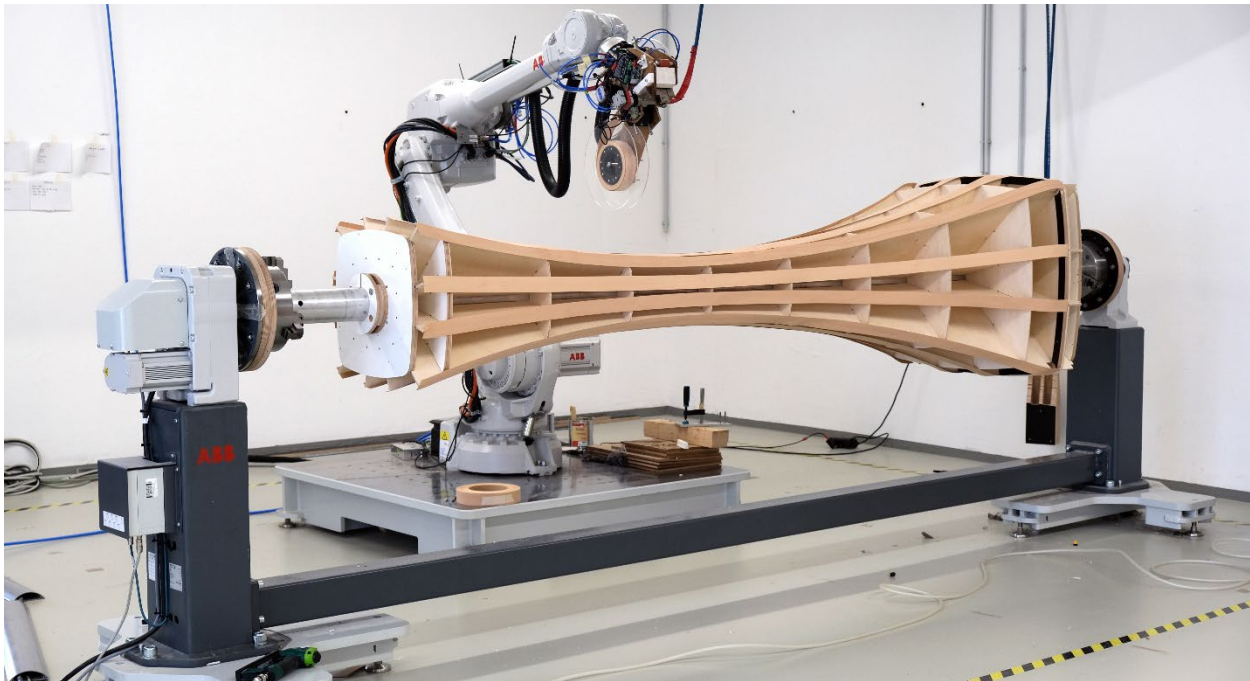


Abb. 105 Lagenaufbau der Stützenbauteile



7 ARCHITEKTONISCHE ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN

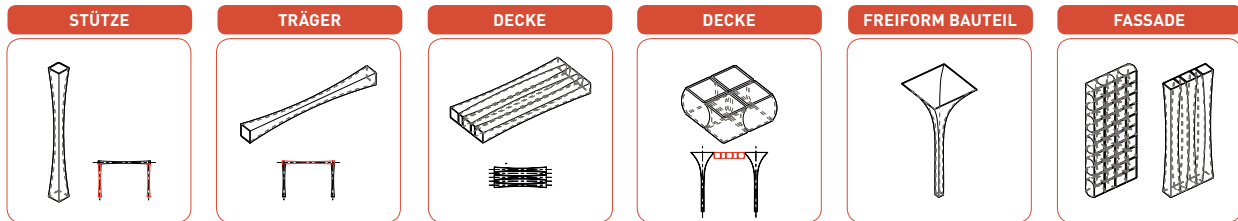


Abb. 106 Architektonische Anwendungsmöglichkeiten

7.1 Geometrische Möglichkeiten

Neben der Entwicklung von computerbasierten Entwurfsmethoden und robotischen Fertigungstechniken wurden architektonische Anwendungsmöglichkeiten für robotisch gewickelte Hohlbauteile aus Furnierholz untersucht.

Die Bauteilgeometrie hat in der Architektur einen großen Einfluss auf Konstruktion, architektonische Funktion und Anwendungsbereiche. Anhand einer Evaluierung unterschiedlicher Geometrien wurde durch Definition von Krümmungen in Abhängigkeit zur Furnierbreite und -stärke eine Bibliothek möglicher Bauteile erstellt, die mit dem Wickelverfahren hergestellt werden können.

Durch experimentelle Untersuchungen wurde ein Mindestbiegeradius von 4mm festgelegt, der aus dem Elastizitätsgrad von Furnierstreifen mit 0,3mm Dicke resultiert. Hiermit ist eine Reihe unterschiedlicher konvexer Querschnitte realisierbar – von dreieckigen über polygonale bis hin zu runden Profilen.

Ebenso sind asymmetrische Querschnitte vorstellbar. Konkave Querschnitte wurden in den Untersuchungen bisher nicht genauer betrachtet, da diese entweder extrem schnell aushärtende Klebstoffe oder sehr komplexe Schalungssysteme erfordern, die in den Forschungsarbeiten nicht vorgesehen waren.

Es fanden außerdem Untersuchungen zu unterschiedlichen Querschnittsgeometrien entlang eines Bauteils statt. Hier sind sowohl positive als auch negative Gaußsche Krümmungen möglich.

7.2 Bauteilanwendungen

Aus den aufgezeigten möglichen Bauteilgeometrien wurden unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten evaluiert, z.B. der Einsatz als Einzelelement als Stütze, Träger oder Freiformbauteil oder kombiniert in einer Reihe aufeinanderfolgender Bauteile als Decke oder Fassade, die je nach Funktion unterschiedlich ausgerichtet werden können (Abb. 106). Hierfür wurden minimale und maximale Fertigungsgrößen überprüft und definiert, die mithilfe standardisierter Industrieroboter und verfügbaren Materialien in korrespondierenden architektonischen Bauteilgrößen hergestellt werden können. Auf der im Kapitel 6 beschriebenen Anlage können Bauteile mit einem maximalen Durchmesser von ca. einem Meter und einer maximalen Länge von 4m effizient hergestellt werden.

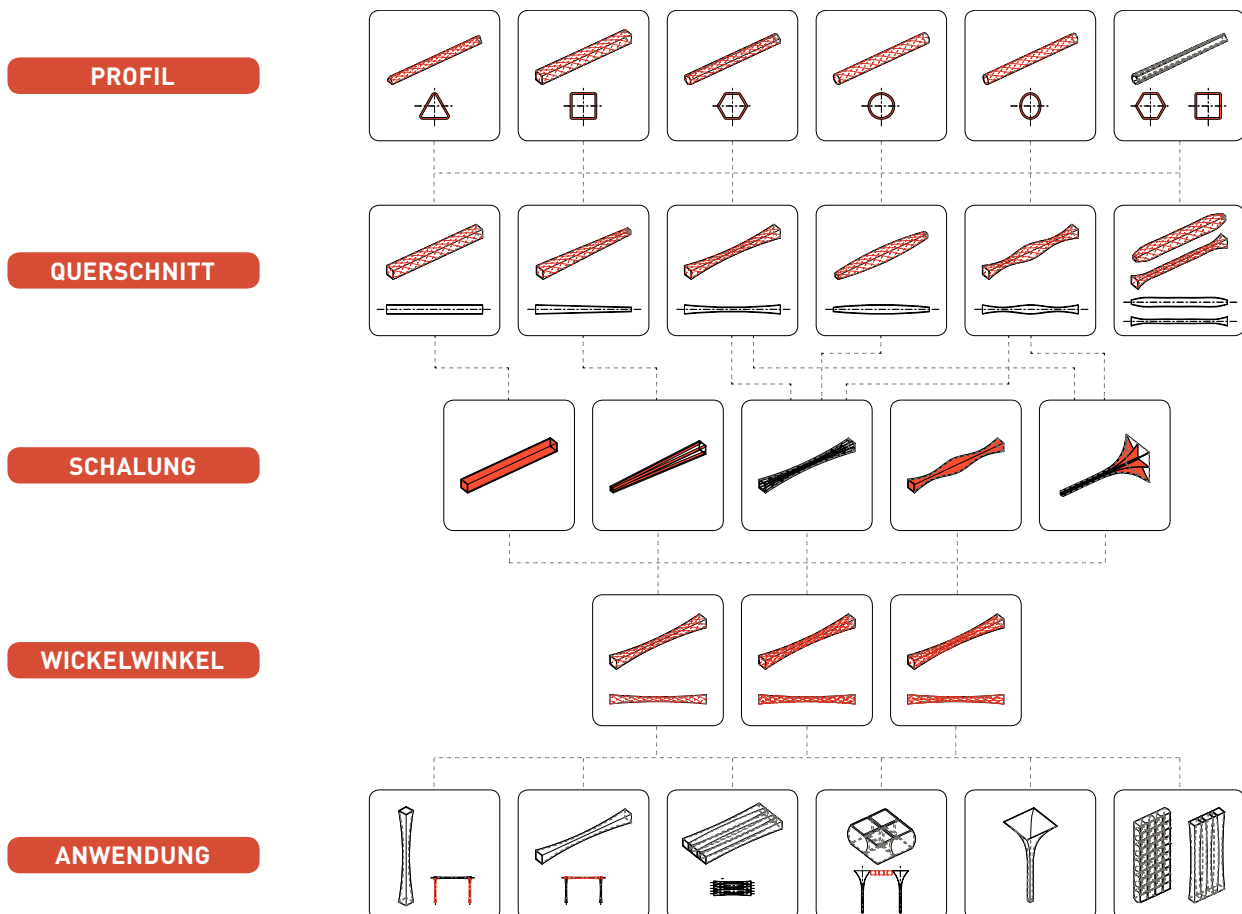


Abb. 107 Baukastenprinzip

7.3 Modulare Systeme

Diese Anwendungsoptionen lassen sich durch ein Baukastenprinzip mit einem modularen System kombinieren, das mit wenigen Elementen auskommt und sich u.a. für temporäre Bauwerke durch einen einfachen Aufbau, Auseinanderbau und Wiederaufbau eignet (Abb. 107).

Modulare Architektur kann durch eine funktionale Unterteilung in separate, frei skalierbare, wiederverwendbare Komponenten mit einer konsequenten Nutzung modularer Schnittstellen charakterisiert werden (Dahmus, Gonzalez-Zugasti und Otto 2000). In diesem Zusammenhang bezieht sich das Baukastenprinzip auf Komponentenebene. Hierfür werden Systeme aus separaten, repetitiven Bauteilen

(Standardelementen) genutzt, die in ihrer Größe, Form und Funktionalität gleich sind. Diese können miteinander verbunden, ausgetauscht oder hinzugefügt werden (Claypool et al. 2020).

Im Zuge der Forschungsarbeiten wurden geeignete, robotisch gewickelte Komponenten für modulare Systeme untersucht. Hierfür wurden computerbasierte Fallstudien und geometrische Analysen mithilfe ausgewählter Software erstellt.



7.4 Individualisierungsmöglichkeiten

Wickeltechniken bieten spezifische Entwurfs- und Individualisierungsmöglichkeiten, wie beispielsweise die Steuerung der Faserorientierung und damit verbunden die Materialverteilung innerhalb eines Bauteils, als auch geometrische Formen mit integrierten Verbindungslösungen zu erzeugen.

Hierfür bieten die folgenden Parameter verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten: Zum einen führt die gesamte Oberflächengeometrie mit unterschiedlichen Querschnitten zu Mustervariationen, da sich die verschiedenen Krümmungen auf der Oberfläche selbst unmittelbar auf die erzeugte Wickellinie auswirken. In Verbindung damit definiert der Startwinkel der geodätischen Linie ihren Weg auf der Oberfläche, so dass durch die Verwendung verschiedener individuell orientierter Wickellinien (z.B. im oder gegen den Uhrzeigersinn) ein erstes Grundmuster entsteht. Dieses Muster kann erweitert werden, indem durch die Anordnung der Wickelreihenfolge und des Abstands zwischen den einzelnen Filamenten ein Flechteffekt entsteht.

Infolge der beschriebenen Individualisierungsmöglichkeiten können Bauteile mit strukturell abgeleiteten Formen gestaltet werden, wie z.B. gegen Knickbelastung optimierte hohle Stützelemente oder Wickelmuster mit gradueller Materialverteilung. Ebenso lassen sich gleichmäßige Übergänge von Stützen zur Decke für einen optimalen Kräfteverlauf realisieren. Auch die Integration von formschlüssigen Verbindungselementen oder geometrisch ineinandergreifenden Bauteilen sind denkbar.

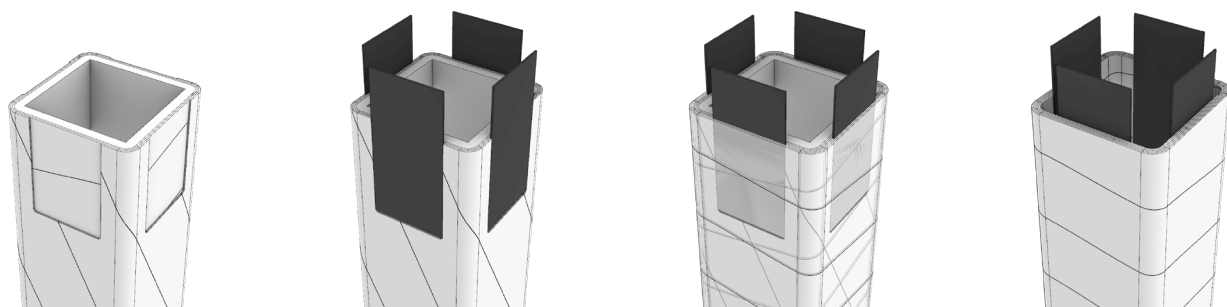


Abb. 109 Beispiel von eingelegten und umwickelten Verbindungselementen

7.5 Verbindungstechniken

Zur Verbindung der verschiedenen Bauteile untereinander können unterschiedliche Verbindungstechniken eingesetzt werden. Diese sind abhängig von der Bauteilgröße, -geometrie und der individuellen Anwendung.

Denkbar sind hier beispielsweise Verbindungselemente, die eingelegt und umwickelt werden, wie aus der Faserverbundwerkstofftechnik bekannt (Abb. 109). Ebenso sind Kleb- oder Schraubverbindungen denkbar, die innen oder außen an dem Bauteil befestigt werden. Auch formschlüssige Verbindungen, für die die gefertigten Bauteile unmittelbar nach dem Wickelprozess auf der Roboteranlage durch einen prozessintegrierten Toolwechsel eingefräst werden können, sind denkbar. Bei runden Bauteilgeometrien mit geringem Querschnitt können auch Stecksysteme, die sich im Bauteil aufspreizen und verkeilen, realisiert werden (Abb. 108). Darüber hinaus wurde im Zuge des Forschungsdemonstrators „BBSR Research Prototype“ (Kap. 7.6) eine spezielle Verbindungstechnologie mit angeleimten Holzteilen entwickelt und realisiert.



Abb. 108 Beispiellösung einer Steckverbindung bei runden Querschnitten



7.6 Realisierte Anwendungen

Auf Grundlage der aufgezeigten architektonischen Anwendungsmöglichkeiten sind im Zuge der Forschungsarbeiten verschiedene prototypische Bauteile entstanden (Kap. 6.5). Mit der beschriebenen Prozesstechnik wurde bei einem vom BBSR ausgeschriebenen Realisierungswettbewerb zur Fertigung eines Forschungspavillons der 1. Preis realisiert. Ziel war es, eine experimentelle Dachstruktur mit innovativen Fertigungstechnologien zu fertigen und auf der Fachmesse digitalBAU 2022 in Köln zu präsentieren.

Hierfür wurde ein modulares Deckensystem aus rechteckigen, gewickelten Hohlprofilen konzipiert, die von einzelnen pilzförmigen Stützelementen getragen werden. Die modulare Bauweise erlaubte es die Forschungsstruktur nach dem Aufbau und der Nutzung auf der Messe in ihre Einzelteile zu demontieren und in neuen Konfigurationen wieder aufzubauen. Ein Konzept für eine mögliche Nachnutzung wurde im Rahmen des Wettbewerbs erstellt.

Nach der digitalBAU-Messe wurden Teile der Struktur im Ausstellungskonzept „Wissenspeicher“ der Universität Kassel während der documenta fifteen in Kassel präsentiert. Zeitgleich wurden Elemente auf dem Zukunft Bau Pop-up Campus in Aachen aufgestellt.

digitalBAU 2022

Der 7x7m große Forschungspavillon BBSR Research Prototype wurde vom 31.05. – 02.06.22 auf der Fachmesse digitalBAU in Köln präsentiert (Abb. 110 – Abb. 113).



Abb. 110 BBSR Research Prototype auf der digitalBAU 2022 in Köln



Abb. 111 BBSR Research Prototype auf der digitalBAU 2022 in Köln

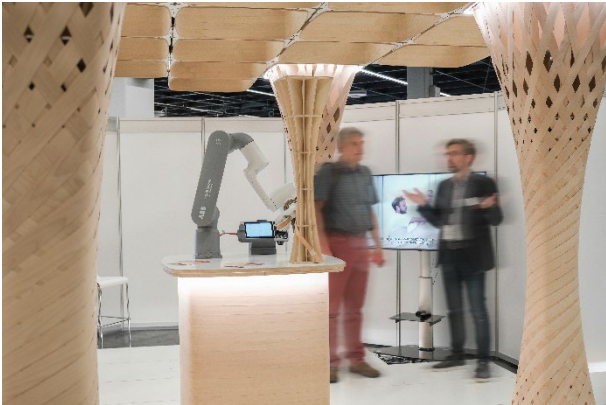


Abb. 112 Forschungspavillon BBSR Research Prototype auf der Fachmesse digitalBAU 2022 in Köln

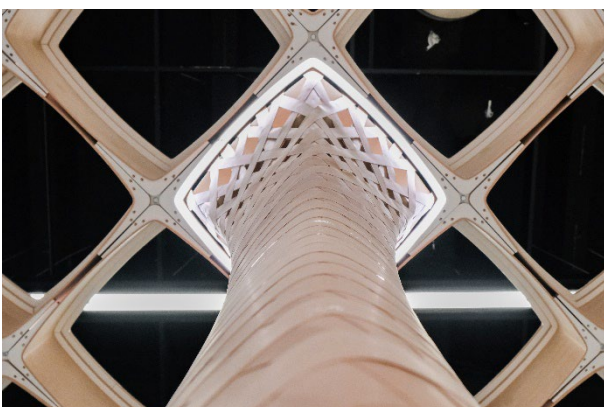
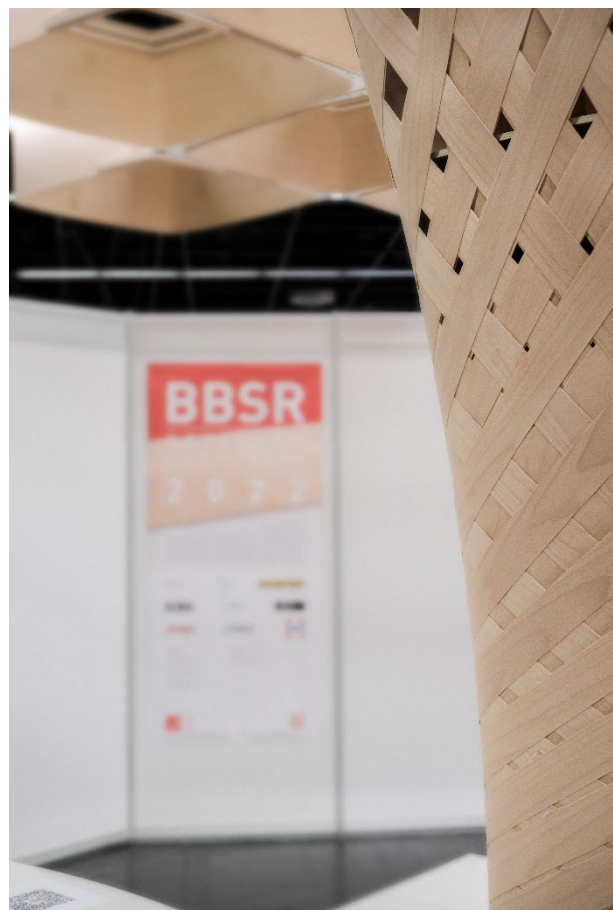


Abb. 113 Forschungspavillon BBSR Research Prototype auf der Fachmesse digitalBAU 2022 in Köln



Zukunft Bau Pop-up Campus



Abb. 114 Nachnutzung der Teilstruktur auf dem Pop-up Campus

Als Nachnutzungskonzept wurde ein Teil des modular aufgebauten Forschungspavillons in einer neuen Konfiguration auf dem Pop-up Campus in Aachen präsentiert (F20-22-4-007) (Abb. 114). Hierfür wurden zwei Stützen mit 10 Deckenmodulen aufgebaut. Im unteren Bereich fungierten unterschiedlich hohe Module sowohl als Fundament, als auch als Sitzgelegenheiten und Tischelemente.

Das Projekt war Teilprojekt des hier beschriebenen Forschungsprojekts 3DWoodWind. Im Zeitraum des Pop-up Campus beschäftigte sich das Projekt konkret mit dem Thema der Wiederverwendbarkeit/Umnutzung der Bestandteile des modularen Messe-Pavillons. Hier wurde das Augenmerk auf die Modularität im gesamten Gebäudesystem gelegt. Für die Umnutzung der Elemente im Rahmen des Pop-up Campus mussten vorerst die potentiell geeigneten Umfelder vor Ort untersucht werden, wofür vor allem

lichte Raumhöhen und -größen, sowie Zugänglichkeit für Auf- und Abbau zu betrachten waren. Der Fokus lag auf der Modularität der Leichtbaudeckenelemente, welche im neuen Umfeld sowohl in Anordnung, als auch für eine Nutzung als Kombination aus Fundament und Interior-Design-Elemente verändert werden sollten. Hiermit sollte die Effektivität der Module für Umnutzungszwecke und somit die Möglichkeit einer zirkulär ausgerichteten Bauweise erforscht werden.

Hierfür wurden die Elemente des genannten Messe-Pavillons zunächst auf Neuordnung geprüft und generelle Regeln und Anforderungen für die Umnutzung aufgestellt. Der Bestand in Aachen wurde untersucht, sowie Maßstabs- und Kombinationsmöglichkeiten für verschiedene Räume erstellt.



Die Modularität der Deckenelemente wurde nun auch auf die Fundamentelemente übertragen. Hierzu wurden neue Modulkombinationen aus Bodenplatte der Säulen, Wickelelementen und Abschlussplatten entworfen, die eine Mehrfachnutzung (Fundament und Sitzgelegenheit) erzeugen. Beleuchtungsverblendungen wurden angepasst. Die zuvor entworfenen Elemente der Modulkombinationen und Verblendungen wurden gefertigt und testweise assembliert. Darauf folgend wurde die Montage für die entworfenen Elemente digital geplant, die Bauteile für den Transport vorbereitet und vor Ort aufgebaut. Die Ausstellung des Pavillons war vom 28.07. bis 19.09.2022 auf den Festivalwochen in Aachen zu sehen.

Das Teilprojekt Pop-up Campus zeigt auf, dass die Kreislauffähigkeit durch die Modularität der einzelnen Elemente durch geringfügige Anpassungen erreicht und umgesetzt werden kann. Somit ergibt sich ein ganzheitliches Building-System aus immer gleichen Modulen, die additiv und damit materialeffizient hergestellt werden können. Durch das dreidimensionale Grid-System lassen sich unterschiedlichste Räumlichkeiten erzeugen, wodurch auf sich ändernde Anforderungen reagiert werden kann.

Im Zuge des Projekts konnte die Zirkularität durch Umnutzung der Module und die Anpassung an die Gegebenheiten im Bestand aufgezeigt werden: Die meisten Elemente des Messe-Pavillons konnten ohne Anpassung übernommen werden, ausschließlich für die Fundamentelemente wurden neue Bauteile hergestellt, die aber zukünftig weiterhin modular für freistehende Anordnungen verwendet werden können. Die Integration in die Ausstellung des Pop-Up-Campus konnte nach Evaluierung unterschiedlicher räumlicher Konzepte verwirklicht werden. Außerdem wurde die topologische Möglichkeit zur Veränderung der Nutzung der Module für weitere unterschiedliche Zwecke – Fundamente, Decken- und Bodenelemente, sowie als Elemente für Interior- & Furniture-Design - aufgezeigt.

Wissensspeicher



Abb. 115 Nachnutzung der Teilstruktur beim Wissensspeicher

Zeitgleich zum Pop-up Campus wurde in der interaktiven Ausstellung „Wissensspeicher“ der Universität Kassel während der documenta fifteen vom 20. Juli bis 20. August 2022 100 Ideen aus der Wissenschaft für eine nachhaltigere Zukunft präsentiert.

Als Teil der Ausstellung wurde ein Ausschnitt der Gesamtstruktur bestehend aus einer Stütze mit vier Deckenmodulen ausgestellt (Abb. 115).



8 AUSWERTUNG / FAZIT

8.1 Prozessparameter und Abhängigkeiten

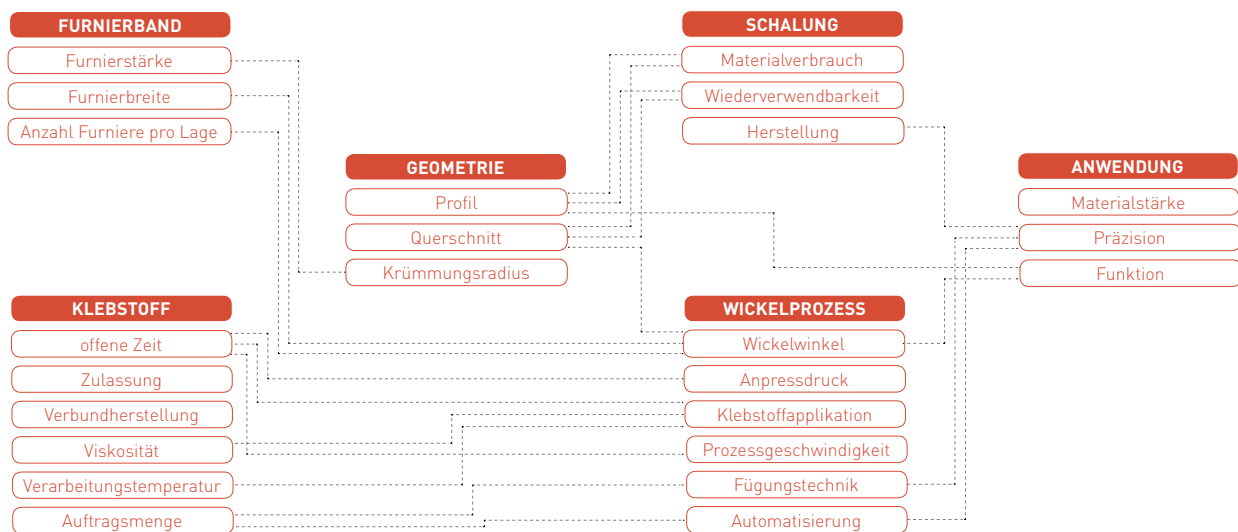


Abb. 116 Prozessparameter und Abhängigkeiten

Für die Herstellungstechnik von materialeffizienten Leichtbauteilen aus Furnierholz ergeben sich eine Reihe an Abhängigkeiten und Anforderungen an die Prozessparameter, die sich untereinander stark bedingen und je nach Anwendungsfall aufeinander abgestimmt werden müssen (Abb. 116). Diese lassen sich in folgende, übergeordnete Komponenten kategorisieren: Furnier, Klebstoff, Geometrie, Schalung und Wickelprozess.

Aus der jeweiligen Anwendung resultieren zunächst diverse Anforderungen an das Bauteil hinsichtlich seiner Funktion, der Präzision und der Materialstärke und -eigenschaften des Hohlprofils. Auf dieser Grundlage wird eine Bauteilgeometrie mit definiertem Profil, Querschnitt und Wandstärke erzeugt.

Die herzustellende Geometrie generiert unmittelbar Einflussfaktoren an das Schalungssystem, welches die jeweilige Form abbilden und die Bauteilpräzision gewährleisten muss. Gleichzeitig muss das gewickelte Bauteil ausgeschalt werden können und die Schalung Anforderungen an die Wiederverwendbarkeit und einen möglichst geringen Materialverbrauch erfüllen.

Darüber hinaus beeinflussen die Anforderungen an die mechanische Belastbarkeit des Bauteils sowohl die Geometrie, als auch der Lagenaufbau, die Faserrichtung und den damit einhergehenden Wickelwinkel. Dies sind wesentliche Einflussfaktoren für den Wickelprozess selbst. Simultan wirkt sich dies auf die Furnierstärke und -breite (inklusive Krümmungsradius) und die Anzahl der Furnierbänder pro Lage aus, was wiederum sowohl die Automatisierung als auch die Prozessgeschwindigkeit grundlegend prägt.

Neben den geometrischen Rahmenbedingungen beeinflusst insbesondere auch die Auswahl des Klebstoffsystems den automatisierten Fertigungsprozess. Hier stellen die Klebstoffart mit offener Zeit, Viskosität, Verarbeitungstemperatur und Auftragsmenge u.a. Anforderungen an den Anpressdruck, die Applikationstechnik und die Geschwindigkeit im Wickelprozess.

Die komplexen Abhängigkeiten verlaufen dabei nicht unidirektional, sondern stets bidirektional: Möglichkeiten und Grenzen der Herstellungstechnik haben unmittelbaren Einfluss auf die verschiedenen Prozessparameter. Änderungen einzelner Segmente tangieren das Gesamtsystem.



8.2 Prüfverfahren

Um quantifizierbare und vergleichbare Kennwerte zu generieren, wurde ein aus den vorgeschalteten Experimenten resultierendes Prototypenbauteil hinsichtlich seiner Präzision geprüft, analysiert und ausgewertet. Die Untersuchungen sahen Abgleiche zwischen dem reell gefertigten Bauteil und dem digitalen 3D-Modell zur Definition der Gesamtpräzision vor.

Toleranzabgleich

Zur Präzisionsbetrachtung der gewickelten Bauteile wurde ein gleichförmiges Rechteckmodul gewählt und die Geometrie mit Hilfe einer 3D-Messtechnik analysiert und mit dem digitalen 3D-Modell verglichen.

Die Vermessung des prototypischen Prüfkörpers fand mit einem "Artec Eva" Strukturlicht-3D-Scanner statt; die Erfassungsgenauigkeit liegt bei 0,1 mm. Aus den ermittelten dreidimensionalen Messdaten wurde eine Punktwolke generiert, aus der die gesamte Bauteilgeometrie erfasst werden konnte. Im weiteren Prozess wurde die dreidimensional vermessene Bauteilgeometrie mit dem digitalen 3D-Modell abgeglichen. Hierfür wurde die Software Artec Studio verwendet.

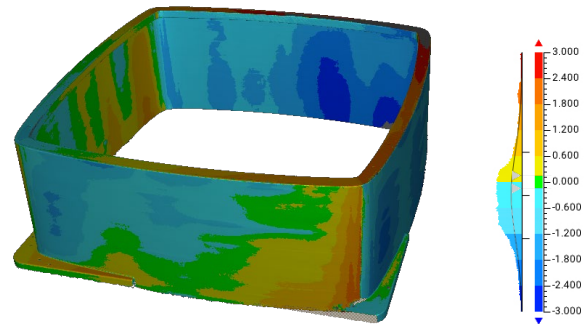


Abb. 117 Soll-Ist-Abgleich eines gewickelten Hohlprofil-Bauteils

Eine Farbskala zeigt die Abweichungen zwischen realem und digitalem Modell (Abb. 117 / Abb. 118). Wie aus den Abbildungen hervorgeht, sind lediglich geringe Abweichungen von wenigen Millimetern zum digitalen 3D-Modell ersichtlich. Die überwiegenden Abweichungen liegen im Bereich von -1,20mm bis +0,30mm; darüberhinausgehende Abweichungen kommen nur partiell vor. Das gewickelte Hohlprofil-Bauteil besitzt somit eine sehr hohe Gesamtpräzision.

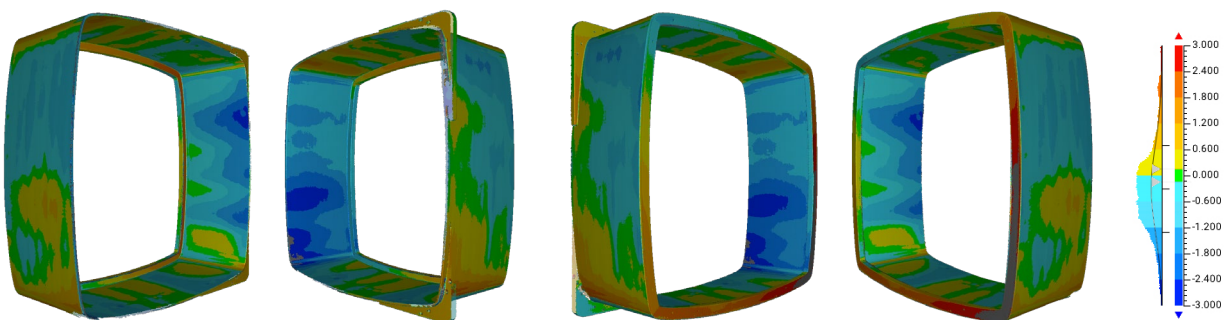


Abb. 118 Toleranzabgleich eines gewickelten Hohlprofil-Bauteils von allen Seiten (im Uhrzeigersinn gedreht von links nach rechts)



8.3 Ökobilanzierung

Um generelle Aussagen darüber treffen zu können, inwiefern sich gewickelte Hohlprofile aus Furnierholz für eine mögliche Substitution von anderen Bauteilen und Materialien aus ökologischen Aspekten eignen und eine erste Einschätzung über die potentiellen Umwelteinwirkungen der beiden Materialsysteme geben zu können, wurde in Kooperation mit dem Center for Environmental Systems Research (CESR) der Universität Kassel im Zuge einer Seminararbeit unter der Leitung von Dr. Clemens Mostert eine vergleichende Ökobilanz durchgeführt (Brumm et al. 2022). Hierfür wurde ein Anwendungsfall basierend auf Fassadenprofilen definiert, um einen unmittelbaren Vergleich von linearen Bauteilen mit anderen Materialien herstellen zu können. Im Folgenden werden die getroffenen Rahmenbedingungen und resultierenden Ergebnisse zusammengefasst.

Festlegung der Zielsetzung und des Untersuchungsrahmens

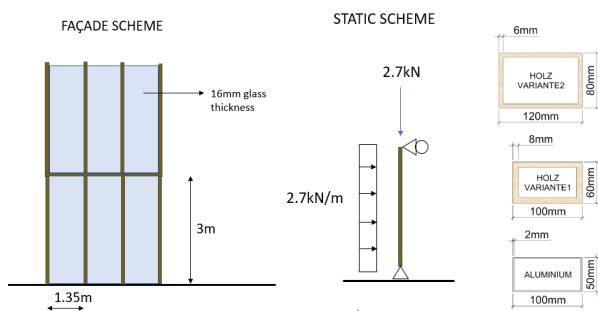


Abb. 119 Schematische Darstellung von Fassadenaufbau, statischem System und Querschnitt der zu vergleichenden Hohlprofile

Um die beiden Komponenten zu vergleichen, wurden die Herstellungsprozesse mit der Software openLCA und der integrierten Datenbank ecoinvent nach der Ökobilanzmethode DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 modelliert. Für die Auswertung der Ergebnisse wurde die gängige Methode der fünf Fußabdrücke als Wirkungsanalyse herangezogen, wobei die Wirkungsindikatoren des Energie- (KEA), Klima- (GWP), Material- (RMI und TMR) und Wasser-Fußabdrucks berücksichtigt wurden. Für das Aluminiumprofil wurde ein

Sekundäraluminiumgehalt von 50 % angenommen, wofür - ergänzend zur Ökobilanz im openLCA - eine Sensitivitätsanalyse erfolgte.

Als Systemgrenze für die Ökobilanz wurde der Cradle-to-Gate-Ansatz bestimmt, wonach die drei Prozessschritte Rohstoffgewinnung, Vorprodukte und Produktion in der Analyse für beide Bauteile berücksichtigt wurden. Die Nutzung und die Entsorgung blieben bei der Bewertung unberücksichtigt, da zum Zeitpunkt der Erstellung noch keine weitgehenden Studien zur Nutzungsdauer der holzbasierten Hohlprofile vorlagen.

Zur Definition einer funktionellen Einheit wurde als Grundlage zunächst ein klassischer Fassadenaufbau mit einem gängigen Raster von 1,35m und einer Höhe von 3m, sowie einer 16mm dicken Verglasung gewählt (Abb. 119). Für die Kalkulation des Profilquerschnitts und der Wandstärke wurde auf Grundlage des Fassadenaufbaus ein statisches Berechnungsmodell erstellt. Hierfür wurde angenommen, dass die Profile einer Horizontallast von 2,7kN/m standhalten sowie eine Vertikallast von 2,7kN aufnehmen müssen. Da hierbei zwei vollkommen unterschiedliche Materialsysteme miteinander verglichen werden und davon auszugehen ist, dass Aluminium unter der Annahme gleicher Dimensionen stets größere Festigkeitswerte gegenüber Holz aufweist, wurde als funktionelle Einheit die mechanische Widerstandsfähigkeit betrachtet und die Profilabmessungen dahingehend angepasst. Mit dem angenommenem Lastfall ergeben sich daraus folgende Abmessungen: Für Aluminium wurde ein Profil von 50x100mm und einer Wandstärke von 2mm angenommen; für gewickelte Hohlprofile aus Furnierholz zwei Möglichkeiten betrachtet: Ein Profil von 60x100mm bei 8mm Wandstärke (Variante 1) bzw. 80x120mm bei einer Wandstärke von 6mm (Variante 2). Aufgrund des geringeren Gewichts von Variante 2 (7,06kg) verglichen mit Variante 1 (7,59kg) wurde erstere für die weiteren Untersuchungen festgelegt.



Ergebnisse und ökologischer Vergleich

Basierend auf den resultierenden Ergebnissen der Sachbilanz, wurde eine ökologische Bewertung durch die Gegenüberstellung der jeweiligen Fußabdrücke, bezogen auf die gemeinsame funktionelle Einheit, vollzogen. Anhand der nachfolgenden Abbildung (Abb. 120) lässt sich ableiten, dass das Holzprofil unter umweltbezogenen Aspekten im Vergleich zu Aluminium als wesentlich ökologischer zu bewerten ist.

Der Klimafußabdruck stellt die für den Klimawandel maßgeblich beeinflussende Wirkungskategorie dar. Der dazu entwickelte Wirkungsindikator GWP (Global Warming Potential) betrachtet diesen über einen Zeithorizont von 100 Jahren. Wie anhand der Abb. 120 ersichtlich wird, liegt der GWP₁₀₀-Wert des Holzhohlprofils bei ca. 7,47 kg CO₂-Eq im Gegensatz zu Aluminium, dessen Wert bei ca. 33,48 kg CO₂-Eq liegt. Das sind lediglich 22% der CO₂-Equivalenten des Aluminiumprofils. Die Differenz der beiden Klimafußabdrücke beträgt damit 26,01 kg CO₂-Eq, was gleichsam die mögliche Reduktion darstellt, welche eine Substitution des Aluminiumprofils durch ein gewickeltes Holz-Hohlprofil pro funktioneller Einheit erzielen könnte.

Bezüglich des Materialfußabdrucks TMR liegt das Holzprofil mit 17,85 kg ca. 63 % unterhalb des Fußabdrucks des Aluminiums, welches einen TMR von 47,70 kg aufweist. Unter genauerer Differenzierung in die jeweiligen biotischen und abiotischen Fraktionen lässt sich zudem erkennen, dass bei der Aluminiumproduktion bis auf einen vernachlässigbar kleinen Anteil der gesamte Materialfußabdruck auf abiotische Rohstoffe zurückzuführen ist. Neben der deutlichen Differenz in der eingesetzten Rohstoffmenge kann demnach auch eine signifikant nachhaltigere Produktion der Hohlprofile indiziert werden, da es sich bei Holz um

einen biotischen, nachwachsenden Rohstoff handelt. Darüber hinaus kann abgeleitet werden, dass mit den zur Herstellung des Aluminiumprofils notwendigen Rohstoffen pro funktioneller Einheit die vierfache Menge an Holzprofil produziert werden kann.

Besonders deutlich wird der Unterschied bei der Betrachtung des Gesamt-Wasserfußabdrucks: Dieser liegt für die Herstellung inklusive Vor- und Lieferketten mit 50.930 m³ bei Aluminium deutlich über demjenigen des Holzbauteils mit 6.479 m³, was insgesamt 87 % ausmacht.

In Bezug auf den Energiefußabdruck fällt die Differenz mit ca. 11% weniger deutlich aus wie bei den übrigen Fußabdrücken. Bei genauerer Betrachtung fällt jedoch auf, dass der Einsatz fossiler Energien bei der Herstellung eines Aluminiumbauteils um 55% höher liegt. Außerdem beinhaltet die Kalkulation auch die Energie aus Biomasse, die beim Holzbauteil mit 133,7 MJ-Eq verglichen mit dem eines Aluminiumbauteils mit 4,5 MJ-Eq um ein Vielfaches höher liegt, jedoch keinen Energieverbrauch darstellt, da die Menge auf den Brennwert der Biomasse zurückzuführen ist.

Die Ergebnisse der Wirkungskategorien zeigen, dass die Herstellung gewickelter Furnierholz-Hohlprofile eine geringere Umweltbelastung mit sich bringt und diese dementsprechend als Substitut für Aluminiumbauteile verwendet werden könnten. Durch Weiterentwicklung und Anpassung an die Funktion der Bauteile können möglicherweise die Wandstärken als auch der Klebstoffeinsatz reduziert werden, was sich wiederum positiv auf die einzelnen Wirkungskategorien auswirken würde.

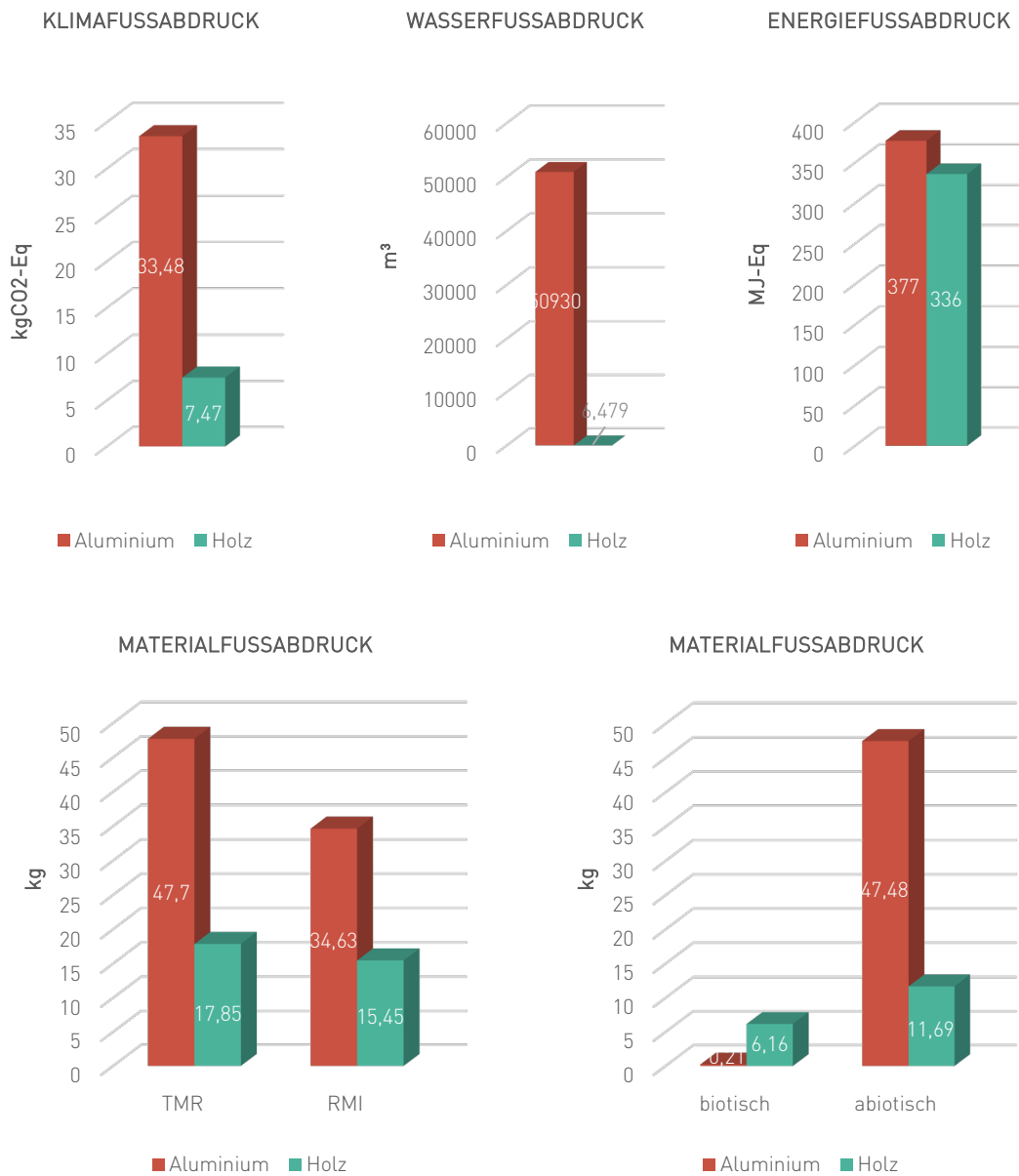


Abb. 120 Vergleich der Fußabdrücke von Holz und Aluminium



8.4 Resümee & Ausblick

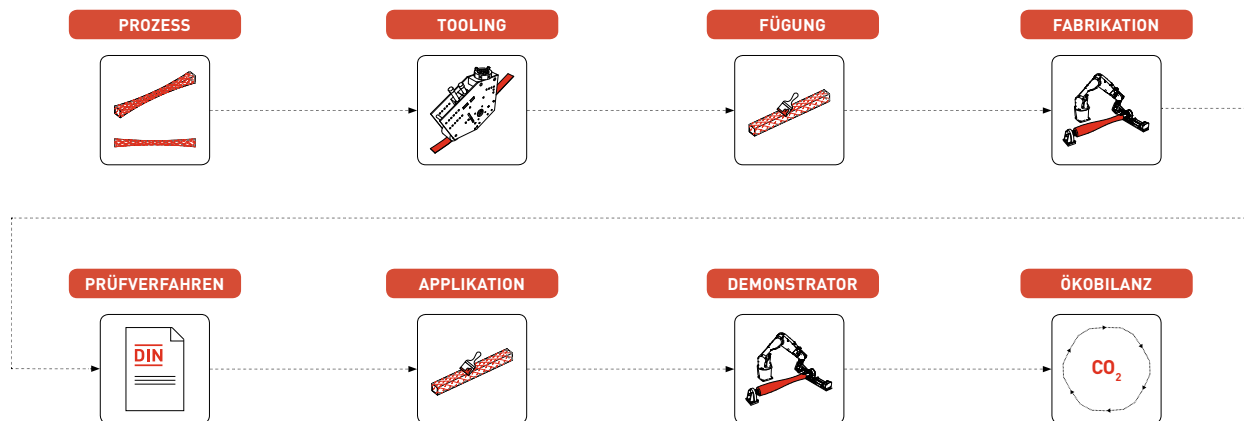


Abb. 121 Überblick Forschungsstand

Das Forschungsprojekt 3DWoodWind hat eine neue Generation von additiven Technologien für den Holzbau entwickelt. Dabei wurde ein modulares Bausystem mit einem dreidimensionalen robotergestützten Wickelverfahren für materialeffiziente hohle Leichtbauteile realisiert. Eine intelligente Kombination und Gestaltung von modularen Komponenten zu mehrstöckigen Strukturen könnte in Zukunft Massivholzplatten und -träger sowie Betonplatten und Stahlprofile ersetzen.

Im Zuge der Forschungsarbeiten konnten die in den Arbeitspaketen definierten Fragestellungen untersucht werden (Abb. 121):

Zunächst fanden experimentelle Untersuchungen des Materialsystems statt, aus denen Ergebnisse in einem evolutiven Prozess aus Versuchsproben, Messungen und Belastungsproben gewonnen werden konnten. Dies beinhaltete u.a. die Auswahl geeigneter Klebstoffsysteme, die für die Fügung der einzelnen Lagen mit der Fertigungstechnik in Frage kommen sowie eine Evaluierung des Klebstoffanteils in einem Bauteil. Darüber hinaus fanden Untersuchungen zum Mindestbiegeradius des Furniers in Abhängigkeit der Materialstärke und zur Furnierbreite in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie und -größe statt, um eine Selektion geeigneter Furnierkanten je nach Anwendungsfall zu treffen. Die Erkenntnisse wurden dokumentiert, ausgewertet und in Bezug zueinander gesetzt.

Für die Herstellung von gewickelten Hohlprofilen wurden verschiedene Strategien und Materialien für Schalungssysteme - in Abhängigkeit unterschiedlicher Bauteilgeometrien - konzeptioniert, untersucht, miteinander verglichen und kategorisiert. Für geometrisch komplexere Bauteile wurden insbesondere Spantenschalungen detailliert ausgearbeitet und prototypisch umgesetzt.

Darüber hinaus fanden kleinmaßstäbliche Untersuchungen zu unterschiedlichen Wickelwinkeln und Konzepte für einen optimierten Lagenaufbau statt.

Für die robotische Fertigung wurden Auftragswerkzeuge entwickelt und zunächst prototypisch hergestellt und im weiteren Verlauf über Prozessversuche optimiert und auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse angepasst. Parallel hierzu wurde die Auftrags- und Prozesstechnik über digitale Prozesssimulation entwickelt sowie Prozessparameter über physische Versuche zunächst im kleinen Maßstab definiert und folgend auf die große Anlage überführt.

Mit dem Maßstabssprung wurde nicht nur das Schalungssystem weiterentwickelt und auf die größere Bauteildimensionierung angepasst, sondern gleichzeitig entscheidende Parameter im Hinblick auf den robotischen Wickelprozess und das Materialsystem neu konfiguriert. Dies beinhaltete parallel die umfangreiche Integration einer voll automatisierten Klebstoffapplikation in den Prozess mit intensiven Untersuchungen zum Auftragsverhalten selbst, sowie dem erforderlichen Anpressdruck. Hiermit konnten die Genauigkeit des Auftrages und die Präzision der entstehenden



Bauteile optimiert werden. Erste großmaßstäbliche Prototypen wurden infolgedessen hergestellt und analysiert.

Darauf aufbauend wurden – wie im Forschungsantrag vorgesehen – Demonstrator-Bauteile im 1:1 Maßstab digital konzeptioniert, robotisch gefertigt und anschließend analysiert. Die Umsetzung fand auf unserer großen Anlage statt, auf der Bauteile bis zu ca. 3,50m gewickelt werden können. Die erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse aus den noch offenen Forschungsfragen konnten hieran überprüft werden.

Eine besondere Herausforderung stellte dabei die Präzision im großen Maßstab. Diese wurde über einen Toleranzabgleich mittels 3D-Scanning überprüft.

Darüber hinaus wurden im Zuge der Forschungsarbeiten sowohl digitale als auch analoge Fallstudien zu geometrischen Möglichkeiten und Grenzen der Herstellungstechnik erstellt und ausgewertet.

Das Projekt wurde im Zuge des Pop-up Campus Teilprojekts auf den 30.11.2022 (ursprünglich 30.07.2022) verlängert. Aufgrund der Corona-Pandemie und einem Vaterschaftsurlaub kam es zu Projektverzögerungen, wodurch das Projektende auf den 31.12.2022 kostenneutral verlängert wurde.

Mit dem Einsatz von Holzfurnier stellt die entwickelte Herstellungstechnik eine Alternative zu synthetischen Fasern wie Kohlenstoff- oder Glasfasern dar, die üblicherweise beim Wickeln verwendet werden, sowie zu den im Bauwesen bekannten Massivholzprodukten. Hierdurch weist die Herstellungstechnik für materialeffiziente Leichtbauteile aus Furnierholz ein hohes Potenzial im Hinblick auf Ressourcenschonung auf. Durch die Klimakrise sind in der

Baubranche zunehmend ressourceneffiziente Bauweisen gefragt, sodass es insbesondere in den letzten Jahren einen enormen Zuwachs im Holzbau gegeben hat. Nun stehen wir aktuell in Folge langer Trockenperioden und Schädlingsbefall vor einem ernsthaften Problem: Die natürlichen Ressourcen gehen aus und treiben die Preise in die Höhe. Es besteht also dringender Bedarf nach der Entwicklung materialsparender Holzbauweisen, welche den hohen Bedarf an Nadelhölzern entlasten.

Innerhalb des Forschungsprojekts wurden insbesondere der Umgang mit Ressourcen und die Entwicklung neuer Bauprozesse sowie die Etablierung klima- und umweltfreundlicher Bauweisen adressiert. Mit der Herstellung eines modularen Bausystems, das auf großflächige Anwendungen in mehrgeschossigen Strukturen abzielt, wurden im Forschungsprojekt neue Verfahren und Techniken für eine zukunftsweisende und nachhaltige Entwicklung demonstriert.

Im Zuge der Forschungsarbeiten konnte die Prozesstechnik für eine Realisierung großmaßstäblicher Demonstratoren vollständig entwickelt werden. Großer Forschungsbedarf liegt noch sowohl in der Optimierung einzelner Prozesskomponenten wie z.B. der Auftragstechnik und dem Schalungssystem als auch in der Untersuchung alternativer Klebstoffsysteme und Verbindungstechniken. Darüber hinaus sollen in Zukunft durch die Weiterentwicklung der computerbasierten Entwurfsmethoden und einer ingenieurbau-technischen Untersuchung der Bauteile optimierte Geometrien mit angepassten strukturellen Eigenschaften entstehen. Diese Fragestellungen sollen in einem möglichen Folgeprojekt untersucht werden.



9 ANHANG

9.1 Danksagung

Projektbeteiligte

Elias Arayess
 Guido Brinkmann
 Nils Eckhardt
 Sebastian Körner
 Julian Lienhard
 Ilija Majcen
 Georgia Margariti
 Clemens Mostert
 Seyed Mobin Moussavi
 Björn Raschper
 Moritz Reh
 Andrea Rossi
 Birgit Schön

Forschungsförderung

Forschungsinitiative Zukunft Bau
 Arnd Rose

Kooperationspartner

Jowat SE
 H. Heitz Furnierkantenwerk GmbH & Co. KG
 Oest GmbH & Co. Maschinenbau KG





9.2 Literaturnachweis

BASF SE. 2018. ACRODUR® - Formaldehyde-free acrylic binders for elevated nonwoven performance. Januar. https://dispersions-resins-products.basf.us/files/brochures/ACRODUR_BASF_Value-Card_LR_210319_193650.pdf [zugegriffen: 4. Juli 2022].

Brandis, Robert L. 1990. Animal Glue. In: *Handbook of Adhesives*, hg. von Irving Skeist, 123–134. Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/978-1-4613-0671-9_6, https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0671-9_6.

Brockmann, Walter, Paul Ludwig Geiß, Jürgen Klिंगen, Bernhard Schröder, Stanislav Gorb, Jens Kiesewetter, Stefan Mattle, Herrmann Onusseit, Willi Schwotzer und Detlef Symietz. 2005. Anwendungen der Klebtechnik. In: *Klebtechnik*, 205–394. John Wiley & Sons, Ltd. doi:<https://doi.org/10.1002/3527605851.ch8>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/3527605851.ch8>.

Brumm, Nora Katharina, Hendrik Schmitt, Julius Schott und Jennifer Seifert. 2022. Ökologischer Vergleich von materialeffizienten Leichtbauteilen: Furnierholz aus einem robotischen Wickelverfahren versus Aluminium. Ökobilanzierung. Ressourcenverbrauch und Umweltbelastungen der globalen Rohstoffproduktion. Kassel: Center for Environmental Systems Research (Universität Kassel).

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. 2021. Polyurethan-Klebstoffe. 21. Juli. <https://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/klebstoffe/polyurethan-klebstoffe.html> [zugegriffen: 21. Juli 2021].

Claypool, Mollie, Manuel Jimenez Garcia, Gilles Retsin, Clara Jashke und Kevin Saey. 2020. Discrete Automation. *ACADIA 2020: Distributed Proximities* Volume I: Technical Papers [Proceedings of the 40th Annual Conference of the Association of Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)]: 638–647.

Dahmus, Jeffrey, Javier Gonzalez-Zugasti und Kevin Otto. 2000. Modular Product Architecture. In: , vol 35142:225–235.

DIN e. V. 2021. DIN EN 204 Klassifizierung von thermoplastischen Holzklebstoffen für nichttragende Anwendungen; Deutsche Fassung EN 204:2016.

<https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nhm/wdc-beuth:din21:250353597> [zugegriffen: 29. Oktober 2021].

Dunky, Manfred und Peter Niemz. 2002. *Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-642-55938-9, <https://www.springer.com/de/book/9783540429807> [zugegriffen: 5. Oktober 2020].

Jowat SE. 2021a. Tragender Holzleimbau. *Jowat Klebstoffe*. <https://www.jowat.com/de-DE/anwendungen/holzindustrie/massivholzverarbeitung/tragenderholzleimbau/> [zugegriffen: 4. Juli 2022].

Jowat SE. 2021b. Massivholz. 21. Juli. https://www.jowat.com/additional-data-sheets/560/Deutsch/P005406642-0e1e_deutsch.PDF [zugegriffen: 21. Juli 2021].

Jowat SE. 2021c. Jowacoll® Five Star 102.49. 21. Juli. https://www.jowat.com/additional-data-sheets/832/Deutsch/P007115855-b7b8_deutsch.PDF [zugegriffen: 21. Juli 2021].

Kremer Pigmente GmbH & Co. KG. 2011. 63000 Knochenleim, klassischer Glutin-Warmleim. 6. Juli. <https://web.archive.org/web/20110706071702/http://www.kremer-pigmente.de/63000.htm> [zugegriffen: 4. Juli 2022].

9.3 Abbildungsverzeichnis

Alle verwendeten Abbildungen: Eigene Darstellungen Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren FB06 | Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung Universität Kassel