

# **Individual Layer Fabrication (ILF) – Ein neues Verfahren zur additiven Fertigung von Bauteilen aus Holz**

Frauke Bunzel  
Fraunhofer-Institut für Holzforschung,  
Wilhelm-Klauditz-Institut WKI  
Braunschweig, Deutschland





# Individual Layer Fabrication (ILF) – Ein neues Verfahren zur additiven Fertigung von Bauteilen aus Holz

## 1. Einleitung

Für eine zukunftsfähige, ökonomisch und ökologisch nachhaltige Baubranche werden neue Lösungen hinsichtlich Rohstoffeinsatz, Materialkombinationen und neuen Fertigungsverfahren benötigt. Ein wichtiger Aspekt ist zudem die Automatisierung und Digitalisierung bei gleichem Maß an Individualisierung. Daher werden in der Baubranche mittlerweile bereits additive Fertigungsverfahren zum Bau von Gebäuden eingesetzt, die die Voraussetzungen für ein nachhaltiges Bauen erfüllen. Insbesondere wird Material z.B. durch optimierte Formgebung oder teilgefüllte Strukturen eingespart werden.

Jedoch dominieren bei der additiven Fertigung im Bauwesen die mineralischen Werkstoffe, insbesondere Beton. Additive Fertigungsverfahren für das Bauen mit Holz stehen aktuell nicht zur Verfügung. Zwar wurden bereits einige additive Verfahren für Holzverbundwerkstoffe entwickelt, allerdings wird dabei das Holz in Kombination mit thermoplastischen Kunststoffen eingesetzt und der Holzanteil beträgt maximal 40 %. Aus solchen Werkstoffen hergestellte Produkte sind für tragfähige Strukturen nicht geeignet. Additive Fertigungsverfahren mit sehr geringem Bindemittelanteil und folglich hohem Holzanteil sind bisher nicht verfügbar.

Daher wird im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs «Additive Manufacturing in Construction – AMC» am Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI, Braunschweig, und an der Technischen Universität München (TUM) ein neues Verfahren zur additiven Fertigung mit Holz entwickelt – «Individual Layer Fabrication – ILF».

Die geometrische Freiheit des ILF Verfahrens ermöglicht eine kraftflussgerechte Bauteilgestaltung. Material in nicht lasttragenden Bauteilregionen kann gezielt ausgespart werden (Topologieoptimierung), was zu einer Einsparung von Ressourcen führt. Darüber hinaus kann die gestalterische Freiheit der additiven Fertigung dazu genutzt werden, verschiedene Funktionen in ein Bauteil zu integrieren. Als Beispiele können hier die Integration von Kabelkanälen und Lüftungsrohren oder von zusätzlicher Wärme- und Schalldämmung genannt werden.

## 2. Individual Layer Fabrication – ILF

ILF kann als eine Kombination der beiden additiven Fertigungsverfahren «Binder Jetting» und «Sheet Lamination» beschrieben werden. Wie bei der Sheet Lamination werden Objekte durch Laminieren dünner, individuell konturierter Einzelschichten (Individual Layer IL) aus festen Materialien aufgebaut. Beim ILF-Verfahren werden diese IL jedoch nicht subtraktiv, sondern additiv durch Binder Jetting hergestellt. Darüber hinaus werden nach dem Klebstoffauftrag und vor dem Laminieren die IL, wie in der Holzwerkstoffindustrie üblich, mechanisch verdichtet. Dies führt zu einer deutlichen Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und senkt den Klebstoffgehalt. Im Ergebnis können mit dem ILF-Verfahren individuelle Formen geschaffen, Material eingespart und tragfähige Bauelemente erzeugt werden.

## 2.1. Verfahrensschritte

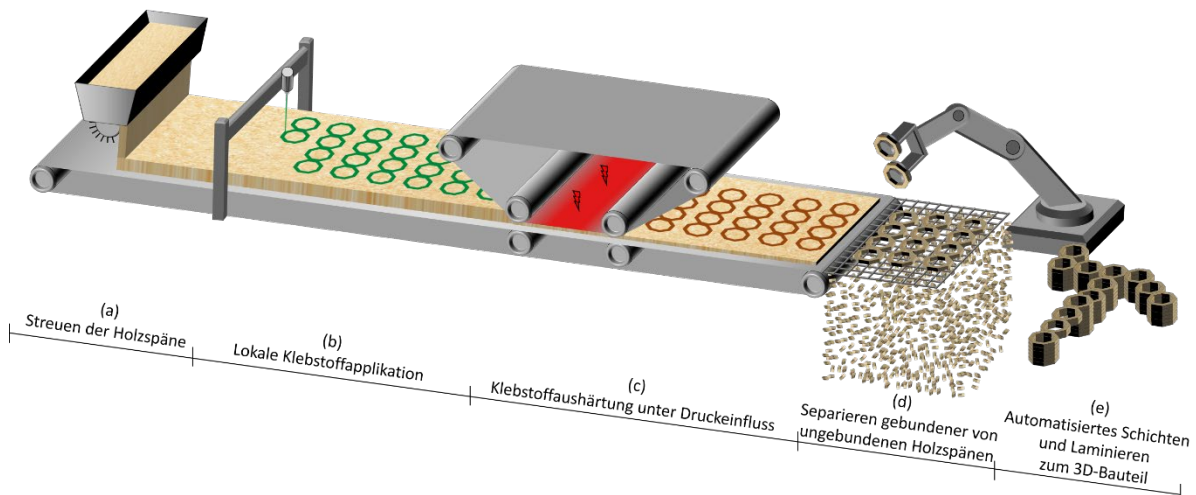


Abbildung 1: ILF-Verfahren unterteilt in die fünf Einzelschritte: Streuung (a), Applikation des Klebstoffs (b), Aushärtung unter Druck und mit erhöhter Temperatur (c), Separierung (d), automatisiertes Schichten und Laminieren (e)

Das IL-Verfahren setzt sich aus fünf Arbeitsschritten zusammen. Zunächst wird eine Schicht aus Holzspänen mit einer definierten Flächenmaße ausgestreut (Abbildung 1, a). Im Gegensatz zur herkömmlichen Spanplattenproduktion werden beim ILF Verfahren jedoch keine mit Klebstoff benetzten Späne ausgestreut, sondern ausschließlich nicht benetzte Späne. Im nächsten Fertigungsschritt wird mit einem Ventilsystem Klebstoff von oben auf die Holzspanschicht appliziert (b). Der Klebstoffauftrag erfolgt lokal nur dort, wo er bauteilgeometrisch benötigt wird. Die Holzspanschicht, bestehend aus mit Klebstoff benetzten und nicht benetzten Spänen, wird mit mechanischem Druck gepresst und der Klebstoff mittels Wärmeintrag zum Aushärten gebracht (c). Nach dem Aushärten werden die nicht gebundenen Holzspäne entfernt (d), wodurch die entsprechend der angestrebten Bauteilgeometrie konturierte 2D-IL freigelegt wird. Diese 2D-IL werden automatisiert aufeinandergeschichtet, miteinander verklebt und bilden so das 3D-Bauteil (e). Die entfernten Holzspäne sind frei von Bindemittel und können somit dem Fertigungsschritt (a) erneut zugeführt werden. Wie bei allen additiven Fertigungsverfahren geht dem physischen Herstellungsprozess ein digitaler Prozess voraus, bei dem, in der Regel durch virtuelles Schneiden eines 3D-CAD-Modells, die Geometrie jeder Einzelschicht generiert wird. Die beschriebene Prozesskette des ILF-Verfahrens stellt lediglich eine Grundvariante dar. Abweichend davon können die Reihenfolge der Arbeitsschritte je nach Bauteil und Anforderungen verändert, der Prozess um weitere Arbeitsschritte ergänzt oder einzelne Schrittfolgen mehrfach wiederholt werden, bevor zum nächsten Prozessschritt weitergegangen wird. So können z. B. das Streuen der Späne und der Klebstoffauftrag vor dem Pressen (Aushärten des Klebstoffes) mehrfach wiederholt werden, sodass eine Einzelschicht des ILF-Verfahrens aus mehreren Lagen des Binder Jettings besteht. Auch kann nach dem Herstellen der 2D-IL ein subtraktiver Arbeitsschritt eingefügt werden, um die Konturgenauigkeit zu erhöhen. Des Weiteren können die ungebundenen Holzspäne nicht schon nach dem Pressen der IL, sondern erst nach dem Laminieren entfernt werden. Sie können dadurch als Stützmaterial beim Laminieren der IL zum finalen 3D-Bauteil dienen. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden bereits verschiedene Demonstratoren hergestellt, um die mögliche Auflösung und Geometriefreiheit des ILF-Verfahrens zu illustrieren (Abbildung 2). [1], [2], [3]



Abbildung 2: Demonstrator Objekt hergestellt mit dem ILF-Verfahren zur Veranschaulichung der geometrischen Freiheit

## 2.2. Klebstoffe

Neben der Entwicklung und Optimierung der Teilschritte des ILF-Verfahrens erfolgt deren prozesstechnische Kombination und Integration zu einem vollautomatisierten Prozess. Für die Herstellung von konturgenauen IL ist eine kontrollierte Klebstoffapplikation auf die gestreuten Späne notwendig. Aber nicht nur die Applikationstechnik, sondern auch die Verteilung des Klebstoffes auf und in der gestreuten Holzspanschicht wird untersucht. Die Klebstoffe unterscheiden sich in ihrem Eindringverhalten direkt nach der Applikation sowie im Fließverhalten bei Wärme- und mechanischer Druckzuführung beim Heißpressen. Der von oben applizierte Klebstoff muss die Holzspanschicht komplett durchdringen. Dies setzt eine niedrige Viskosität und geringe Oberflächenspannung des Klebstoffes voraus. Hierzu werden zunächst etablierte Klebstoffe aus der konventionellen Holzwerkstoffindustrie untersucht, wie z. B. Harnstoff-Formaldehyd (UF), Melamin-Formaldehyd (MF), Phenol-Formaldehyd (PF) und polymeres Methylen-Diphenyl-Isocyanat (pMDI). Insbesondere bei den wasserbasierten Klebstoffen konnten Tenside zu einer Verbesserung der Verteilung beitragen. Durch das Fließverhalten kann durch den Wärmeeintrag in der Heißpresse der schnellreaktive Klebstoff noch kurzzeitig fließen, bis die Aushärtung eintritt. Dies kann durch vorgeschaltete Pressschritte mit zunächst geringerem Wärmeeintrag gezielt gesteuert werden. Außerdem zeigen IL mit größeren Pressdrücken und damit höheren Rohdichten eine größere Ausbreitung des lokal applizierten Bindemittels, als es bei IL mit geringeren Rohdichten zu beobachten ist. Dies kann auf die Reduktion der Hohlräume zwischen den Holzspänen zurückgeführt werden, was zum Verdrängen des applizierten Klebstoffes führt. Der Klebstoffgehalt in mit dem ILF-Verfahren hergestellten Einzelschichten beträgt zum gegenwärtigen Zeitpunkt je nach Typ etwa 6 bis 12 %, was bisher einmalig im Bereich der additiven Fertigung mit Holz ist. Hierzu trägt insbesondere das im ILF-Prozess integrierte Verdichten bei. Durch den Einsatz von Produktionsholzresten, rezyklierten Altholz oder bisher nur schwer einsetzbarem Schadholz kann die ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit weiter gesteigert werden. Zudem sind Bindemittel auf Stärke- oder Proteinbasis ebenfalls eine Option, welche in naher Zukunft untersucht werden sollen. Die Wiederverwertung der Inhaltsstoffe nach dem Bauteillebensende wird von Anfang an berücksichtigt, um einer zukunftsorientierten Kreislaufwirtschaft gerecht zu werden.

### **3. Möglichkeiten**

#### **3.1. Wirtschaftlichkeit**

Das ILF-Verfahren bietet das Potenzial, die Individualität eines additiven Fertigungsverfahrens mit der Produktivität und Wirtschaftlichkeit einzelner Prozessschritte der Großserienproduktion von z. B. Spanplatten zu kombinieren. Das Streuen der Späne und Heißpressen kann mit bekannter Technik der konventionellen Holzwerkstoffindustrie erfolgen. Die Klebstoffapplikation erfolgt in diesem Fall nach dem Streuen der Späne und erzeugt durch das lokale Auftragen die bauteilcharakteristische 2D-IL. Anschließend bedarf es noch eines Stapel- und Laminierprozesses der 2D-IL. Die technische Überföhrung des ILF-Verfahrens vom Labor- in den Großserienmastab wird dadurch erleichtert, dass die Prozessstufen Streuen und Pressen aus der konventionellen Holzwerkstoffindustrie übernommen werden können. Diese werden ergänzt durch die spezifischen ILF-Prozessschritte der Klebstoffapplikation sowie des Stapelns und Laminierens. Die Kombination dieser Einzelschritte kann in Fließfertigung erfolgen, was zur Wirtschaftlichkeit des ILF-Verfahrens beiträgt. Die Geschwindigkeit des ILF-Verfahrens hängt von der Geschwindigkeit der Einzelschritte ab. Aktuell ist der begrenzende Verfahrensschritt der Klebstoffauftrag. Dieser wird in den gegenwärtigen Versuchen noch mittels einer von einem CNC-Portal geföhrten Einzeldüse mit einer Fahrgeschwindigkeit von 300 mm/s realisiert. Höhere Geschwindigkeiten sind nicht ausgeschlossen, werden jedoch durch die angestrebte Auflösung bzw. Konturgenauigkeit begrenzt. Eine signifikante Steigerung der Produktivität lässt sich durch den Einsatz von Düsenarrays mit einer großen Anzahl von simultan geschalteten Düsen erreichen. Der Verfahrensschritt des Aushärtens und Verdichtens der IL kann mit einer kontinuierlich arbeitenden Presse realisiert werden, sodass Produktionsgeschwindigkeiten vergleichbar mit denen in der Holzwerkstoffindustrie z. B. in der Spanplattenproduktion erreicht werden können.

#### **3.2. Bauteileigenschaften**

Die Herstellung von IL ermöglicht eine Variation der Zusammensetzung von z. B. Spanart und Klebstoff und damit eine gezielte Steuerung von beispielsweise Dichte und Festigkeit. Das Stapeln und Laminieren von Einzelschichten unterschiedlicher Zusammensetzung zu einem Mehrschichtaufbau bietet die Möglichkeit, z. B. biegebeanspruchte Bauteile belastungsgerecht zu gestalten. IL mit höherem Klebstoffgehalt und größerer Dichte erzeugen die benötigte Biegefestigkeit und -steifigkeit in den Decklagen. IL mit reduziertem Klebstoffgehalt und geringerer Dichte tragen zur Ressourcenschonung bei, indem sie in den geringer belasteten, inneren Bereichen eingesetzt werden. Festigkeiten und -steifigkeiten der mit dem ILF-Verfahren hergestellten Bauteile ergeben sich durch das Zusammenspiel von Materialeigenschaften und Bauteilgeometrie. Letztere kann dank der dem Verfahren innewohnenden Formfreiheit lastpfadgerecht ausgelegt werden. Die Forschenden arbeiten aktuell an den Grundlagen der Fertigungstechnologie. Erste IL wurden bereits mit unterschiedlichen Verfahrensparametern sowie Materialzusammensetzungen additiv gefertigt und auf mechanische Eigenschaften hin geprüft. Die mechanischen Eigenschaften einer IL hängen wie bei den klassischen Holzwerkstoffen maßgeblich von den typischen Faktoren wie z. B. Rohdichte, Dichtequerschnittsprofil, Holzspanfraktion, Klebstoffgehalt und Spanfeuchten ab. Schon nach den ersten Versuchen lässt sich feststellen, dass die hergestellten Einzelschichten den Anforderungen an DIN EN 312, Typ P7 bzgl. Biege- und Querkzugbelastung entsprechen. [4], [5]

#### **3.3. Bauteildimensionen**

Die Einzelschicht lässt sich grundsätzlich mit konventionellen Holzwerkstoffmaschinen in einer üblichen und standardisierten Breite verdichten, während dort unter Wärmezuföhr der lokal applizierte Klebstoff aushärtet. Mit einer kontinuierlich arbeitenden Presse wäre die Länge praktisch endlos. Um die Bauteildimension in der Ebene zu vergrößern, ist es zudem denkbar, dass in einer Ebene mehrere einzeln durch Binder Jetting hergestellte IL-Elemente zusammengesetzt werden. Durch entsprechende automatisierte Hebe- und Handlingwerkzeuge können große IL mit geringer Formsteifigkeit unterstützt gehandhabt werden. Die Formstabilität bzw. -steifigkeit der gepressten IL ergibt sich u. a. durch die

Dichte, Dicke und Spangröße. Die Herausforderung der IL-Dicke liegt wiederum in der limitierten Klebstoffeindringtiefe. Der von oben applizierte Klebstoff auf die gestreute Holzspanschicht dringt hierbei nicht endlos tief ein. Auch hier sind noch nicht alle Grenzen ausgelotet. Die Forschenden limitieren im laufenden Projekt die verdichtete IL-Dicke jedoch zunächst auf maximal 10 mm, um den Fokus zunächst auf die grundsätzliche Machbarkeit des ILF-Verfahrens zu behalten. Zudem sinkt mit zunehmender IL-Dicke auch die Auflösung, was die geometrische Freiheit begrenzt.

## 4. Weiterführende Informationen

Weiterführende Informationen zum Projekt unter [amc-trr277.de/projects/project-area-a/focus-area-project-a08](http://amc-trr277.de/projects/project-area-a/focus-area-project-a08) oder [www.mdpi.com/2073-4360/13/19/3423](http://www.mdpi.com/2073-4360/13/19/3423)

Co-Autoren: Carsten Aßhoff (Fraunhofer WKI), Birger Buschmann (TUM), Klaudius Henke (TUM), Daniel Talke (TUM), Bettina Saile (TUM), Braunschweig/München

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 414265976-TRR 277.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## 5. Literatur

- [1] K. Henke, D. Talke, F. Bunzel, B. Buschmann, and C. Asshoff (2021): Individual Layer Fabrication (ILF) – A Novel Approach to Additive Manufacturing by the Use of Wood. In: *European Journal of Wood and Wood Products*. Berlin, Heidelberg: Springer
- [2] K. Henke, D. Talke and B. Buschmann (2021): Einsatz von Holz bei der additiven Fertigung im Bauwesen. In: *Proceedings of the 17th Rapid.Tech 3D Conference Erfurt, Germany, 22-23 June 2021*, M. Kynast, Ed., München: Hanser, Carl, 2021, pp. 177–187.
- [3] K. Henke, D. Talke, F. Bunzel, B. Buschmann und C. Asshoff (2021): Individual layer fabrication (ILF): a novel approach to additive manufacturing by the use of wood. In: *Eur. J. Wood Prod.*
- [4] B. Buschmann, K. Henke, D. Talke, B. Saile, C. Asshoff und F. Bunzel (2021): Additive Manufacturing of Wood Composite Panels for Individual Layer Fabrication (ILF). In: *Polymers*.
- [5] C. Asshoff, B. Frauke, B. Buschmann, D. Talke, B. Saile, K. Henke (2022): Individual Layer Fabrication (ILF) – Additive Fertigung durch selektives Binden von Holzspänen zu Einzelschichten. In: *Holztechnologie*