

3D-Druck mit Holzwerkstoffen

Materialeffiziente Fertigung von Holzprodukten mittels Liquid Deposition Modeling

Von Michael Rosenthal, Uwe Bodenschatz, Markus Weber, Genia Schlesier*

* Dr.-Ing. Michael Rosenthal ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Forstnutzung der TU Dresden, Uwe Bodenschatz ist freiberuflicher Designer aus Schauenstein, Markus Weber und Genia Schlesier sind Mitarbeiter der Denkstatt Erzgebirge in Seiffen.

Materialeffizienz

Bei der Herstellung von Holzprodukten kommen bisher hauptsächlich subtraktive Fertigungsverfahren zum Einsatz. Die Materialeffizienz ist bei der spanenden Fertigung naturgemäß begrenzt. Holzleisten und Spanplatten müssen gesägt und gefräst werden, um das Material in die gewünschte Form zu bringen. Es entstehen Späne und Verschnitt.

In Deutschland werden pro Jahr über 50 Mio. Holzmöbel produziert. Dabei fallen über 300.000 Tonnen Holzreste und Späne an. Das entspricht einer Waldfläche der Größe von mehreren tausend Fußballfeldern und Holzwerkstoffen im Wert von über 100 Millionen Euro. Durch den Einsatz alternativer Technologien könnte die Menge der Holzreste reduziert oder für die Herstellung von Waren verwendet werden.

Die Ineffizienz des subtraktiven Herstellungsprozesses hat dazu geführt, dass alternative Fertigungsverfahren entwickelt wurden, bei denen weniger Reststoffe entstehen. Bei der additiven Fertigung, auch bekannt als 3D-Druck, wird basierend auf einem digitalen Modell Material Schicht für Schicht aufgetragen. Die Prozesskette ist geprägt durch die direkte Fertigung von Bauteilen basierend auf 3D-CAD-Daten. Allen additiven Fertigungsverfahren ist gemeinsam, dass das eingesetzte Material vollständig im fertigen Werkstück verbleibt bzw. für die Produktion des nächsten Werkstücks zur Verfügung steht, was diese Verfahren sehr materialeffizient macht.

Additive Fertigungsverfahren können in sieben Prozesskategorien unterteilt werden (Tab. 1). Die Werkstoffextrusion umfasst additive Fertigungsverfahren, bei denen Werkstoffe gezielt mit einer Düse dosiert werden. Zu dieser Kategorie zählt etwa das im Hobbybereich verbreitete Verfahren des Fused Deposition Modeling (FDM). In den meisten Fällen wurde Holz in der additiven Fertigung bisher in Kombination mit Thermoplasten eingesetzt (Krapež Tomec & Kariž 2022). Der Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoff muss dabei aufgeschmolzen werden, um im FDM-Verfahren verarbeitet werden zu können, was einen nicht unerheblichen Energiebedarf mit sich bringt (Faludi et al. 2019). Zudem ist der Holzanteil auf maximal 40 % begrenzt.

Tab. 1: Einteilung additiver Fertigungsverfahren in sieben Prozesskategorien (DIN EN ISO 17296-2)

Prozesskategorie	Beispiele	Materialien
Vat photopolymerization (Photopolymerisation im Bad)	Stereolithography	Bad aus flüssigem Photopolymer
Material jetting (Werkstoffauftrag)	Polyjet	flüssiges Photopolymer in Tropfenform
Binder Jetting (Bindemittelauftrag)	3D Printing	Pulver (org. & anorg.) und flüssiges Bindemittel
Powder bed fusion (Pulverbettbasiertes Schmelzen)	Selective Laser Sintering	Pulverförmige Metalle oder Polymere

Material extrusion (Werkstoffextrusion)	Fused Deposition Modeling Contour Crafting Liquid Deposition Modeling	Thermoplaste Beton Pasten (org. & anorg.)
Directed energy deposition (Gerichtete Energieeinbringung)	Laser Metal Deposition	Metall als Pulver oder Draht
Sheet lamination (Schichtlaminierung)	Laminated Object Manufacturing	Platten/ Folien aus Papier, Metall, Polymere

Liquid Deposition Modeling

Ein weiteres Verfahren aus der Gruppe der Werkstoffextrusion ist das Liquid Deposition Modeling (LDM). Es wurde ursprünglich für den 3D-Druck pastöser Materialien wie Ton entwickelt, wobei der Bau von Termitenhügel nachgeahmt wird. Ein anderes biologischen Vorbild stellt der Nestbau von Wespen dar. Sie zerkleinern Holzpartikel, vermischen diese mit oralen Sekreten und lagern den Holzbrei schichtweise aufeinander.

Die Viskosität der Paste muss dabei so eingestellt sein, dass sie sich zwar gut fördern und extrudieren lässt, gleichzeitig aber stabil genug ist, um nach der Ablagerung des Materials die gewünschte Form beizubehalten. Die abschließende Verfestigung der gedruckten Objekte wird durch die Verdunstung des Wassers bzw. durch weitere Reaktionen des Bindemittels erzielt.

Werkstoff

Holzwerkstoffe, die sich mittels LDM additiv verarbeiten lassen, bestehen bis zu 90 % der Trockenmasse aus dem Füllstoff Holz. Es lassen sich dabei genau jene Reststoffe verwenden, die bei der subtraktiven Holzbearbeitung in großen Mengen anfallen. Sägespäne mit größeren Feinanteilen und Schleifstaub haben sich als dabei als besonders geeignet erwiesen.

Als Bindemittel dienen in Wasser gequollene Stärke (Gardan & Roucoules 2014), Alginate oder Celluloseether (Rosenthal et al. 2018). Solange das Material nicht wasserfest sein muss, ist es vollständig recyclebar. Zerkleinert und in Wasser aufgelöst lässt es sich erneut verdrucken.

Durch die Beimischung von Fasern, anorganischen Bindemitteln und Füllstoffen können die Werkstoffeigenschaften gezielt an die spätere Verwendung angepasst werden. Materialuntersuchungen mit additiv gefertigten Prüfkörpern (Abb. 1) haben ergeben, dass sich die Materialschwindung, zu der es im Zuge der Trocknung kommt, von 20 Prozent auf 0 Prozent reduzieren und die Biegefestigkeit von 2 auf 8 MPa erhöhen lässt (Rosenthal et al. 2023).

Für die ersten großformatigen Drucke kam eine Mischung zum Einsatz, die als Bindemittel in Wasser gelöste Carboxymethylcellulose ("Zell-Leim", Baufan Bauchemie Leipzig GmbH) und als Füllstoff Lignobest® C200 der Holzmühle Westerkamp GmbH verwendet. Im Mischungsverhältnis von 1 : 15 : 4,5 (CMC : Wasser : Holzmehl) ergeben sich bei einem Bindemittelpreis von 4 €/kg und einem Holzpreis von 0,63 €/kg Materialkosten in Höhe von 1,24 €/kg.

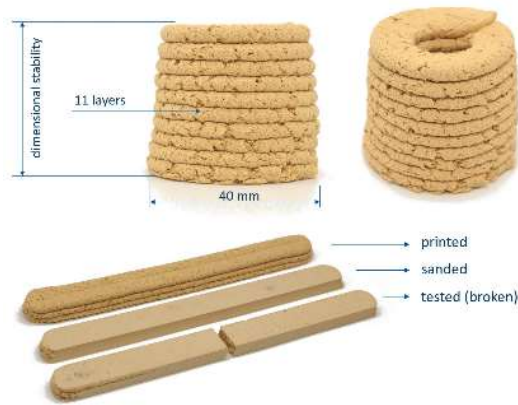


Abb. 1: 3D-gedruckte Prüfkörper für die Ermittlung der vertikalen Schwindung (oben) und der Biegefestigkeit (unten)

Druckprozess

Die Fertigung praxisnaher Produkt-Prototypen erfolgte mit dem ScaraV4 3D-Drucker von 3D Potter. Um einen kontinuierlichen Druckprozess zu erreichen, wurde ein Doppelschneckenextruder entwickelt und mit gängigen FDM-Verfahren hergestellt (Bodenschatz & Rosenthal 2024): Die Extruderschnecken werden durch einen Schrittmotor mit Untersetzungsgetriebe synchron angetrieben. Dies ermöglicht sowohl eine präzise Steuerung der Extrusion als auch ein schnelles Blockieren des Materialausflusses, um ein Austreten des Materials während der Leerlaufbewegung zu verhindern. Der Einzugsbereich des Extruder-Prototypen ist manuell zu befüllen. Das grob vorgemischte Material wird im geschlossenen Bereich des Extruders verdichtet und durch eine 10 mm breite Düse gedrückt (Abb. 2).



Abb. 2: 3D-Drucker mit selbst entwickeltem Extruder

Die Objekte wurden digital mit Fusion360 (Autodesk) entworfen und mit Simplify3d gesliced. Es wurde ein spezieller Vasenmodus verwendet, der einen kontinuierlichen Druckpfad erzeugt, der eine Spirale in Z-Richtung bildet. Die Druckgeschwindigkeit betrug 1,8 m/min, die Schichthöhe 5 mm.

Als Druckbett diente eine 10 mm dicke Spanplatte, die mit einer Stretchfolie bespannt wurde. Nach dem Druckvorgang wurde die Folie rundum abgeschnitten. Das erleichterte ein gleichmäßiges Schrumpfen der gedruckten Objekte und vereinfachte das Ablösen des Objekts. Der etwa fünftägige Trocknungsvorgang wurde durch Kaltluftgebläse unterstützt.

Nachbearbeitung

Die mechanische Nachbearbeitung des getrockneten Werkstoffes ist mit verschiedenen Holzbearbeitungsmethoden möglich (Abb. 3). Das Material lässt sich mühelos und ausrissfrei bohren und fräsen. Die erzeugten Loch- und Fräsflächen sind sehr homogen. Das Hobeln größerer Objekte gelingt mit guter Qualität und nahezu ausbruchsfrei. Eine Bearbeitung mit dem Stemmeisen ist möglich. Die Späne ähneln jenen, die bei der Massivholzbearbeitung entstehen. Die getrockneten Objekte lassen sich zudem leicht schleifen, wobei ein gutes Schliffbild erzeugt wird.

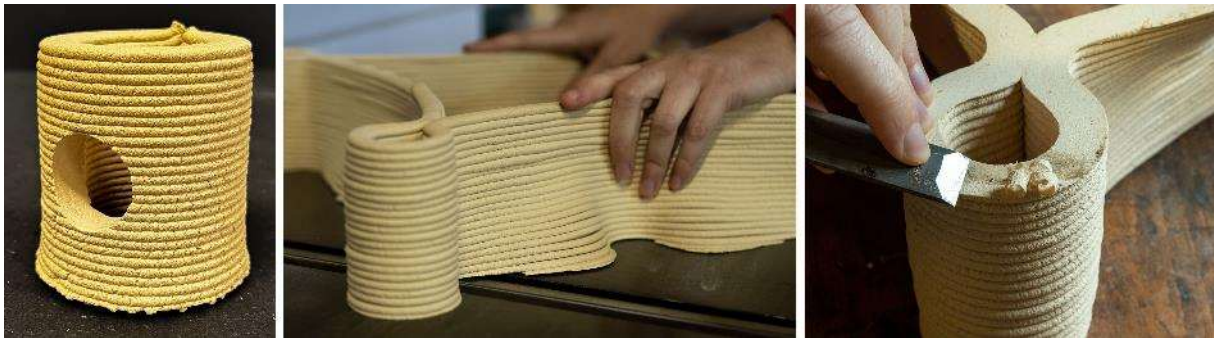


Abb. 3: Untersuchung verschiedener Holzbearbeitungsmethoden – Bohren, Hobeln, Schnitzen

Des Weiteren wurde die Eignung mehrerer Befestigungsmethoden geprüft. Kleben lässt sich das Material mit sich selbst, mit der noch feuchten, pastösen Masse. Dabei werden ähnliche Festigkeiten erzielt, wie im 3D-Druckverfahren. Bei der Verwendung von Schrauben wird eine Auszugsfestigkeit erreicht, die etwa der Hälfte der von Spanplatten entspricht. Sollen 3D-gedruckte Teile an andere Objekte angeschraubt werden, sind Unterlegscheiben zu verwenden, die verhindern, dass der Schraubenkopf in das Material eingezogen wird. Zur Befestigung von Stoffen und Leder lassen sich Klammern einsetzen. Diese haften gut im trockenen Material. Auch randnah ist ein ausbruchsfreier Einschuss möglich.

Anwendungsbeispiele

Die Anwendung des Liquid Deposition Modeling mit Holzwerkstoffen bietet sich perspektivisch insbesondere dort an, wo komplexe Formen angestrebt werden, dabei jedoch sowohl materialeffizient als auch automatisiert gefertigt werden soll. Welche Geometrien mit dem Verfahren bereits heute realisiert werden können und wo weiterer Entwicklungsbedarf besteht, diese Fragen wurden im Zuge praxisnaher Prototypenfertigung untersucht:

Es wurden Schmuckschatullen hergestellt, bei denen der Deckel subtraktiv aus Massivholz und die Dose – unter Verwendung der entstandenen Abfallspäne – additiv gefertigt wurde (Abb. 4). Die erzielbare Präzision beim Fräsen ermöglichte ineinandergreifende Strukturen zwischen beiden Elementen.



Abb. 4: Schmuckschatullen aus gedrechselten Nussbaum-Deckeln und additiv gefertigten Schalen (Rico Denninger)

Für das Gestell eines Beistelltisches (Grundfläche 53 x 53 cm) wurde eine Zarge gedruckt (Abb. 5). Die Höhe der Zarge war auf 18 cm zu begrenzen, da die verwendete Materialrezeptur oberhalb dieser Druckhöhe im noch feuchten Zustand eine eingeschränkte Stabilität hat. Der Designentwurf war von der islamischen Ornamentik inspiriert. Wölbungen in der Zargenwand verbesserten die Wandstabilität während des Druckvorganges. Zylindrische Strukturen an den Zargenecken dienten anschließend der Aufnahme der Tischbeine.



Abb. 5: Beistelltisch mit additiv gefertigter Zarge

In Kooperation mit dem Polstermöbelhersteller „Rolf Benz“ entstand der Prototyp eines gepolsterten Hockers (Abb. 6). Dessen Grundzarge besteht aus Ekelementen und Plattenwerkstoffen. Die additive Fertigung runder Ekelemente ermöglicht punktuell Formfreiheit dort, wo es die Designansprüche erfordern. Zur Aufnahme der mechanischen Belastungen dienten Sperrholz und Faserplatten.

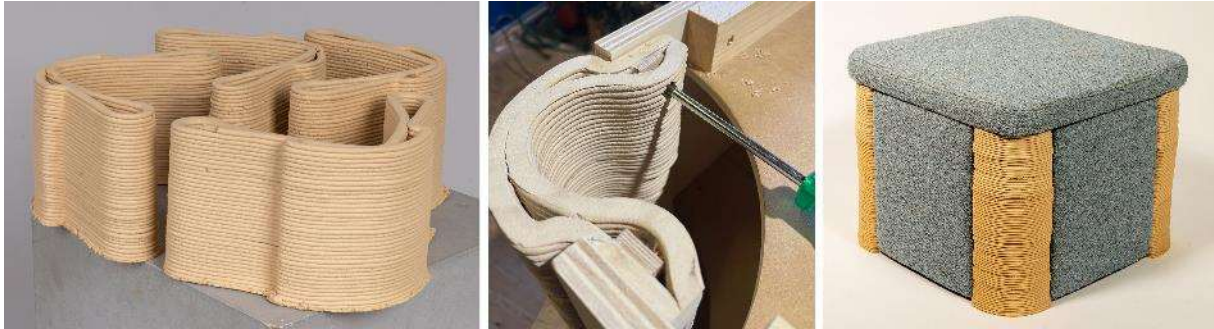


Abb. 6: Polstermöbelgestell als Kombination aus Holzwerkstoffplatten (hier überpolstert) und additiv gefertigten Ecken

Die Fertigung von Grundkörpern pseudoakustischer Gitarren im Unternehmen „Stefan Beyer Instrumente“ erfolgte bisher entweder äußerst materialintensiv durch ein Fräsen aus dem Block oder mittels eines Biegeverfahrens in Handarbeit. Das additive Fertigungsverfahren konnte hier sowohl eine sinnvolle Alternative im Hinblick auf Materialeffizienz und Arbeitszeit, als auch eine größere Formenfreiheit bei geringem Gewicht bieten. Eine Herausforderung stellten insbesondere die äußere Form mit langen gespannten Radien und die notwendige mechanische Belastbarkeit im Bereich von Halsaufnahme und Saitenhalter dar. Das Unternehmen gab die Kontur der Zarge einschließlich der Lage der möglichen inneren Stabilisierungselemente vor. Abb. 7 gibt einen Überblick über die Entwicklungsschritte von der Skizze bis zum mehrstufigen Zargenkörper.

In mehreren Iterationsschritten wurde eine Gitarrenzarge entwickelt und additiv gefertigt, die die Anforderungen des Unternehmens erfüllt. Dieser Rohling wurde plan zugerichtet, die Anschlussstelle des Gitarrenhalses überarbeitet und kleinere zusätzliche Aussparungen im Inneren erzeugt. Die Zarge wurde mit einem Deckel versehen, der grob zugeschnitten auf den gedruckten Körper geklebt und mit einem Fräser mit Anlaufkugellager bündig zur Zarge abgefräst wurde.



Abb. 7: Materialeffiziente und anforderungsspezifische additive Fertigung einer Gitarrenzarge

Die neuen Gestaltungsspielräume, die das Verfahren in Bezug auf das Produktdesign eröffnet, wurden im Rahmen eines internationalen Designworkshops ausgelotet. Am Beispiel eines Kleinmöbels wurden in einem Wechselspiel aus Designideen und der Beobachtung verfahrensseitiger Potentiale und Limitierungen iterativ verschiedene Prototypen einer Fußbank entworfen und gedruckt (Abb. 8). Der Anforderung an die Geometrietreue trotz trocknungsbedingter Materialschwindung konnte durch eine Überlappung von Druckbahnen begegnet werden.

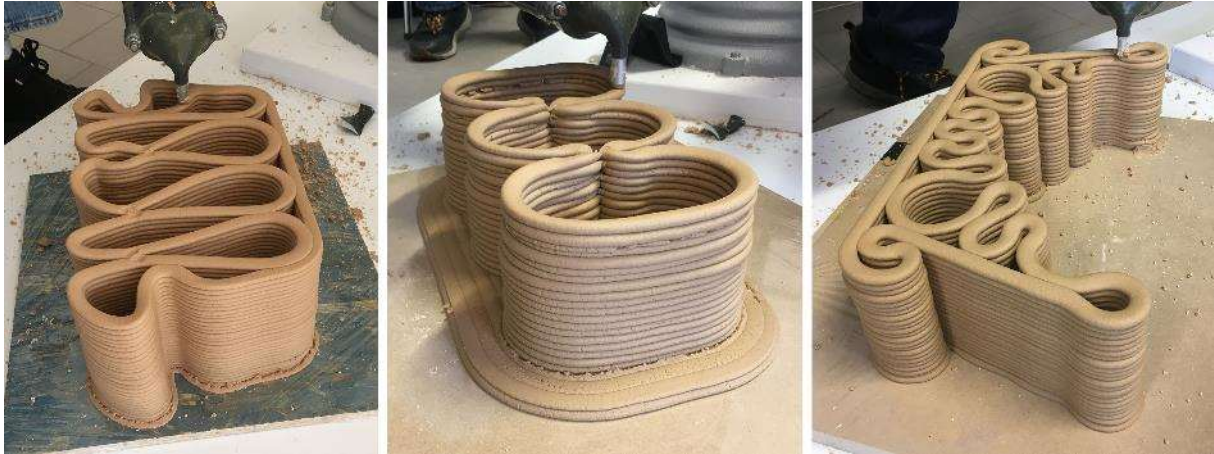


Abb. 8: Neue Möglichkeiten für das Design von Kleinmöbeln mittels additiver Fertigung

Ausblick

Der gegenwärtige Entwicklungsstand des Verfahrens erlaubt bisher die experimentelle Fertigung von Objekten bis zu einer Höhe von 20 cm. Voraussetzung für eine Produktion im industriellen Maßstab ist u.a. eine Automatisierung der Dosier-, Misch- und Förderprozesse. Für die Herstellung höherer Objekte können einzelne additiv gefertigte Segmente form- und kraftschlüssig zu einem Ganzen verbunden werden. Ein laufendes Forschungsvorhaben verfolgt daneben das Ziel, das Material so weiterzuentwickeln, dass Objekte bis 50 cm am Stück gedruckt werden können.

Um interessierten Akteuren aus dem Bereich der Holzverarbeitung das Potential dieser Technologie zu demonstrieren, bietet die Denkstatt Erzgebirge mit Unterstützung der TU Dresden mehrere Workshops an. Gemeinsam mit den Teilnehmern sollen weitere Anwendungsmöglichkeiten erschlossen und in einem kooperativen Prozess Material und Technologie weiterentwickelt werden. Der erste Workshop findet am 27. März 2025 in Seiffen statt (Anmeldungen unter: <https://www.denkstatt-erzgebirge.de>). Weitere Workshops folgen im Mai und September.

Literatur

1. Bodenschatz, U.; Rosenthal, M. (2024): 3D printing of a wood-based furniture element with liquid deposition modelling. *Eur. J. Wood Prod.* 82: 241-244
2. Faludi, J.; Van Sice, C. M.; Shi, Y.; Bower, J.; Brooks, O. M. K. (2019): Novel materials can radically improve whole-system environmental impacts of additive manufacturing. *J. Clean. Prod.* 212: 1-11
3. Gardan, J.; Roucoules, L. (2014): 3D printing device for numerical control machine and wood deposition. *Int. J. Eng. Res. Appl.* 4(12): 123-131
4. Krapež Tomec, D.; Kariž, M. (2022): Use of wood in additive manufacturing. Review and future prospects. *Polymers* 14(6): 1174
5. Rosenthal, M.; Henneberger, C.; Gutkes, A.; Bues, C.-T. (2018): Liquid Deposition Modelling – a promising approach for 3d printing of wood. *Eur. J. Wood Prod.* 76(2): 797-799
6. Rosenthal, M.; Rüggeberg, M.; Gerber, C.; Beyrich, L.; Faludi, J. (2023): Physical properties of wood-based materials for liquid deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal* 29(5): 1004-1013