

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

Abschlussbericht

zum DBU-geförderten Projekt

3D-Druck mit holzbasierten Werkstoffen

Entwicklung einer ressourceneffizienten,
additiven Fertigungstechnologie zur
Herstellung langlebiger Konsumgüter

Aktenzeichen: 38443/01

Projektlaufzeit: 01.10.2023 – 30.11.2025

Projektleiter: Markus Rüggeberg

Verfasser: Michael Rosenthal, Uwe Bodenschatz

Technische Universität Dresden, Professur für Forstnutzung

Tharandt, 19.12.2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis	4
Zusammenfassung.....	5
Einleitung und Motivation.....	5
Hauptteil.....	7
I. Methodik, Vorgehensweise und Projektablauf.....	7
II: Projektergebnisse	8
AP 1: FDM & LDM	8
AP 2: Screening Verfestigung	10
AP 3: Materialentwicklung	12
AP 4: Segmentbauweise	16
AP 5: Prototypenfertigung.....	19
III. Öffentlichkeitsarbeit, Veröffentlichungen, Vorträge	22
Schluss: Fazit und Ausblick	23
Literatur.....	24

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Möbelecke hergestellt im LDM- (links) und im FDM-Verfahren (rechts mit Infillstruktur)	9
Abbildung 2: 3D-gedruckter Prüfkörper der Mischung ZL:KL:W:H = 1:2:13:3,7 zur Bestimmung der Materialschwindung.....	11
Abbildung 7: Grünstauchung der unteren Objektschichten bei einer Last, die einer Objekthöhe von 50 cm entspricht (n = 2)	14
Abbildung 8: Gewichtsverlauf der Holzleichtbetonmischungen bei Wasserlagerung und anschließender Trocknung	15
Abbildung 8: Möbelecke als Konstruktionszeichnung (links) und virtuelle Darstellung der Druckbahnen (rechts).....	16
Abbildung 9: Versuchsaufbau für den LDM-Druck (links), Druckvorgang des Prüfkörpers (rechts)	16
Abbildung 10: Seitliche Schenkel der Möbelecke vor (links) und nach (rechts) Geometriekorrektur..	17
Abbildung 11: Aufbohren mit Bohrschablone und Schlangenbohrer (links), Dübel in der Möbelecke befestigt (rechts)	17
Abbildung 12: Hohes Maß an Passgenauigkeit durch ein Auffädeln der gedruckten Körper auf Rundstangen.....	18
Abbildung 13: Noch feuchter Körper mit Haltevorrichtung, die der Geometriestabilisierung während der Trocknung dient	18
Abbildung 14: Module (oben links), Mulden (oben rechts) als Rohteile nach dem Trocknen und formatierte Module mit eingelegten Mulden zur Aufnahme von kleineren Elementen in Multiplex-Schiene (unten)	19
Abbildung 16: Entwicklungsreihe der Zargenformen.....	20
Abbildung 17: Einbahnige, im Vasenmodus gefertigte Zarge mit Qualitätsproblemen im Bereich langer, relativ gerader Wandbereiche	20
Abbildung 18: Zweibahnige Zarge mit Naht im Halsbereich.....	21
Abbildung 19: Zweibahnige, im Vasenmodus gefertigte Zarge mit wellenförmiger, innerer Stützstruktur.....	21
Abbildung 20: Zweibahnige Zargen mit funktionaler Innenstruktur.....	22
Abbildung 21: Additiv gefertigte Zarge mit Deckel und eingepasstem Gitarrenhals.....	22
Abbildung 24: Präsentation des Projektes zu Interzum-Messe in Köln (2025)	23

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeits- und Zeitplan (UB ... U. Bodenschatz, SB ... S. Beyer Instrumente).....	8
Tabelle 2: Vergleich der additiven Fertigungsverfahren des Fused Deposition Modeling (FDM) und des Liquid Deposition Modeling (LDM) hinsichtlich Verfahrens-, Material- und Produktparameter	9
Tabelle 4: Überblick über die Erstarrungszeiten der mineralischen Bindemittel	12
Tabelle 5: Materialrezepturen mit i.tech ALIPRE (Heidelberg) und Holzmehl Lignobest C200 (Westerkamp).....	12
Tabelle 6: Materialrezepturen mit Next base SR03 (nex) und Holzmehl Lignobest C200 (M) bzw. Sägespänen (S)	12
Tabelle 7: Erstarrungszeiten der Materialrezepturen auf Basis Next base SR03 (nex) und Holzmehl Lignobest C200 (M) bzw. Sägespänen (S).....	13
Tabelle 7: Schwindung (n = 2), Rohdichte (n = 20), Druck- (n = 20) und Biegefestigkeit (n = 7) der schnellhärtenden Holzleichtbetonmischungen.....	14

Zusammenfassung

Eine umweltfreundliche Holznutzung ist ein wichtiger Bestandteil nachhaltiger Entwicklung. Die in der Holzverarbeitung bisher vorrangig eingesetzten subtraktiven Fertigungsverfahren weisen eine eingeschränkte Materialeffizienz auf. Additive Fertigungsverfahren erlauben eine effizientere Verwendung nachwachsender Rohstoffe, indem sie (a) die bei subtraktiven Prozessen anfallende Reststoffmengen stofflich nutzbar machen und (b) aus technologischen Gründen selbst wiederum kaum Reststoffe verursachen (nahezu 100 Prozent des eingesetzten Materials findet sich im fertigen Produkt wieder). Ein vielversprechendes additives Fertigungsverfahren zur Verarbeitung holzbasierter Werkstoffe stellt das Liquid Deposition Modeling (LDM) dar. Diese innovative Technologie ist auf mehrere umweltrelevante Ziele gerichtet: sie dient der Kaskadennutzung bzw. dem Upcycling von Reststoffen, folgt dem Ansatz der Kreislaufwirtschaft in der Holzverwendung und trägt zur Bindung von Kohlenstoff in langlebigen Gütern bei.

Etabliert ist das Verfahren des Fused Deposition Modeling (FDM). Hier kommen Wood-Plastic-Composites (WPCs) zum Einsatz, die zu über 70 Prozent aus thermoplastischen Kunststoffen und zu weniger als 30 Prozent aus Holz bestehen. Das macht das Material relativ teuer und einen hohen Energiebedarf für den Schmelzvorgang zur Folge (AP 1). Beim Liquid Deposition Modeling wird aus Bindemitteln, Wasser und mehl- bis spanförmigen Holzpartikeln ein pastöser Werkstoff hergestellt, der bei Umgebungstemperaturen extrudiert wird und im Nachhinein trocknet bzw. aushärtet. In der Regel besteht der Werkstoff zu über 80 Prozent der Trockenmasse aus Sägemehl, einem Reststoff, der in vielen Holzverarbeitenden Unternehmen anfällt. Verfahrensbedingt wird das Material im feuchten Zustand verarbeitet, wodurch bisher lediglich Druckhöhen von bis zu 20 cm möglich sind (höhere Objekte kollabieren unter ihrer eigenen Last). Der gegenwärtige Entwicklungsstand ist bereits für verschiedene Einsatzzwecke ausreichend. Im Rahmen des Projekts wurde in Kooperation mit einem Musikinstrumentenbauer der Prototyp einer Gitarrenzarge gefertigt (AP 5). Im Projekt wurde die Technologie weiterentwickelt, um größere Objekthöhen realisieren zu können. Im Fokus stand einerseits das Material: In Kooperation mit mehreren Partnern aus Forschung und Industrie wurden verschiedene Möglichkeiten zur Beschleunigung der Materialverfestigung gesichtet, in Untersuchungen getestet und geeignete Rezepturen entwickelt (AP 2 & 3). Mit einem Calciumsulfoaluminat-Bindemittel gelang es schließlich, 60 min nach der Extrusion einen Aushärtungsgrad zu erreichen, der Druckhöhen von mindestens 50 cm ermöglicht. Außerdem wurde ein Verfahren zum nachträglichen Fügen von Segmenten entwickelt: Trocknungsbedingte Formabweichungen mussten zuerst erfasst und in den digitalen Objektentwurf so eingerechnet werden, dass sich beim fertigen Objekt die gewünschte Geometrie ergab. In zuvor festgelegten Aufnahmepunkten wurden Dübel bzw. Rundstangen befestigt, die die vertikale Verbindung und damit die Herstellung höherer Objekte erlaubte.

Einleitung und Motivation

Es existieren eine Vielzahl industrieller Fertigungsmethoden. Eine der ältesten ist die subtraktive Fertigung, die auch als spanende Fertigung bezeichnet wird. Bei dieser Methode wird ein Werkstück aus einem Rohling hergestellt, indem Material durch Drehen, Fräsen, Bohren, Sägen oder Schneiden entfernt wird. Allerdings hat die subtraktive Fertigung einen gravierenden Nachteil: es entstehen Späne und Verschnitt in einem nicht unerheblichen Umfang. Die Materialeffizienz ist bei diesen Herstellungstechnologien folglich eingeschränkt. Nachträgliches Fügen erfordert weitere Materialien und Arbeitsschritte.

Auch in der Holzverarbeitung werden bisher vorrangig subtraktive Fertigungsverfahren eingesetzt. Pro Jahr fallen im Rahmen der Produktion von Holzmöbeln so etwa 350.000 t Holzreste und Späne an

(Wenker & Rüter 2015, Statista 2022). Unter Verwendung alternativer Technologien könnten die anfallenden Restholzmengen reduziert bzw. für die Herstellung von Gütern genutzt werden.

Die Ineffizienz des subtraktiven Herstellungsprozesses hat dazu geführt, dass alternative Fertigungsmethoden entwickelt wurden, die weniger Reststoffe produzieren. Eine dieser Methoden ist die additive Fertigung, auch bekannt als 3D-Druck. Bei der additiven Fertigung 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. Gemeinsam ist allen additiven Fertigungsverfahren (DIN EN ISO 17296-2), dass das eingesetzte Material vollständig im gefertigten Werkstück verbleibt oder für die Fertigung des nächsten Werkstücks zur Verfügung steht. Die Fertigungsweise ist dadurch sehr materialeffizient.

Seit einigen Jahren wird auf eine verstärkte Nutzung von Holz im Bau und als Substitution anderer Werkstoffe hingewirkt. Holz hat viele Vorteile gegenüber traditionellen Baumaterialien wie Beton, Kunststoff und Stahl. Es ist leicht, einfach zu verarbeiten und hat eine geringe Umweltbelastung. Darüber hinaus ist Holz ein nachwachsender Rohstoff und kann somit nachhaltig genutzt werden. Im Hinblick auf den Umgang mit Wäldern spitzen sich jedoch zunehmend Nutzungskonflikte zu. Auf der einen Seite steht die steigende Nachfrage nach Holz, insbesondere in der Bauindustrie. Auf der anderen Seite stehen Naturschutzziele, aus denen die Unterschutzstellung von Flächen (sog. Flächenstilllegungen) folgen. Um diesen Konflikt zu entschärfen, ist ein effizienter Einsatz der Holzressourcen notwendig.

Wichtiger Baustein einer nachhaltigen ökonomischen, sozialen und ökologischen Entwicklung ist eine umweltfreundliche industrielle Herstellung von Produkten (UN-Nachhaltigkeitsziele 9 und 12). Einer nachhaltigen Holznutzung kommt dabei eine entscheidende Rolle zu. Durch den Einsatz innovativer Technologien kann die Klima- und Umweltbilanz der Holzwirtschaft signifikant verbessert werden. Holzwerkstoffe wie Spanplatten, MDF und HDF tragen bereits erheblich dazu bei, die Ressourcen der Holzindustrie effizienter zu nutzen. Diese Werkstoffe werden aus Holzresten und -abfällen hergestellt, die bei der Holzverarbeitung anfallen. Ein nicht unerheblicher Anteil der Holzreste und -abfälle wird jedoch nach wie vor energetisch genutzt.

Das Forschungsvorhaben hat es sich zum Ziel gesetzt, die Nachhaltigkeit in der Holzverarbeitung weiter zu verbessern. An die Stelle der energetischen Nutzung spanförmiger Holzreste soll ihre weitere stoffliche Nutzung (im Sinne der Kaskadennutzung) bzw. die Herstellung neuer Produkte treten. So kann die Effizienz im Holzeinsatz gesteigert und eine verbesserte Ausbeute aus dem Rohstoff Holz erzielt werden. Auf diesem Weg soll ein Beitrag zur Förderung der Kreislaufwirtschaft geleistet werden. Ziel ist es, das Liquid Deposition Modeling mit holzbasierten Werkstoffen als Baustein eines umweltverträglichen Produktionssystems zu etablieren, das vorrangig auf biobasierte Rohstoffe setzt und damit sowohl zur Reduzierung von CO₂-Emissionen als auch zur Bindung von CO₂ beiträgt. Insgesamt soll das Forschungsprojekt zeigen, dass es durch innovative Technologien und eine nachhaltige Produktionsweise möglich ist, die Umweltbelastungen in der Holzverarbeitung deutlich zu reduzieren.

Das Projekt leistet einen wichtigen Beitrag zu einer effizienteren Verwendung nachwachsender Rohstoffe: Erstens zeichnet sich der additive Fertigungsprozess von Holzprodukten durch eine bessere Materialeffizienz aus als traditionelle subtraktive Verfahren. Zweitens kann der additiv verarbeitbare Holzwerkstoff aus den spanförmigen Reststoffen hergestellt werden, die im Rahmen subtraktiver Holzverarbeitungsverfahren sowohl in der Sägeindustrie als auch in Tischlereien entstehen. Da das anfallende Spanmaterial von Tischlereien bisher im Wesentlichen energetisch genutzt wird, trägt das Vorhaben zur Bindung von Kohlenstoff bei. Drittens kommt das Liquid Deposition Modeling zum

Einsatz, das aufgrund seines geringeren Energiebedarfs eine bessere Energieeffizienz aufweist als andere additive Fertigungsverfahren.

In der überwiegenden Zahl der Fälle wurde Holz in der additiven Fertigung in Kombination mit Thermoplasten eingesetzt (Krapež Tomec & Kariž 2022). Bei dem dabei verwendeten Verfahren des Fused Deposition Modeling (FDM) ist der Holzanteil auf maximal 40% beschränkt. Ein alternatives 3D-Druck-Verfahren stellt das Liquid Deposition Modeling (LDM) dar. Mit dieser Technologie können die unterschiedlichsten pastösen Materialien verarbeitet werden: Ton, Lehm, aber auch Holzwerkstoffe. Das LDM ist im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren (etwa dem FDM, bei dem Energie für das Aufschmelzen von Kunststoff benötigt wird), deutlich energieeffizienter (Faludi et al. 2019). Die Werkstoffe werden in Form pastöser Suspensionen verarbeitet, wobei Füllstoffe (z.B. Holzmehl) als feste Phase in einem flüssigen Medium dispergiert sind. Die Paste weist ein belastungsabhängiges Fließverhalten auf: bei hohen Drücken fließt sie wie eine viskose Flüssigkeit, ohne mechanische Belastung verhält sie sich wie ein Festkörper. Die Trocknung bzw. Aushärtung überführt sie in einen abschließenden festen Zustand (Rosenthal et al. 2018).

Die Arbeitsgruppe an der TU Dresden entwickelte in vorangegangenen Projekten Materialmischungen für das Liquid Deposition Modeling unter besonderer Berücksichtigung ökologischer Gesichtspunkte. Dabei kamen wasserbasierte Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen zum Einsatz (z.B. Stärke). Bei der Verwendung von Buchensägemehl und in Wasser gelöster Methylcellulose als Bindemittel konnte der Holzanteil auf bis zu 89 % der Trockenmasse gesteigert werden. Auch weitere Bindemittel, Füllstoffe und Fasern wurden verwendet und deren Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften Materialeigenschaften untersucht (Rosenthal et al. 2023a). Es gelang ein erster Schritt in Richtung Upscaling des LDM-Verfahrens. Mit Hilfe eines 1,8 m großen 3D-Druckers und eines eigens entwickelten, kontinuierlichen Pastenextruders wurde die Zarge eines Beistelltisches gefertigt (Bodenschatz & Rosenthal 2024). Die begrenzte Stabilität der bisherigen Materialmischungen im feuchten, nicht ausgehärteten Zustand führt jedoch dazu, dass Objekte ab Druckhöhen von über 20 cm unter ihrer eigenen Last kollabieren (Rosenthal et al. 2023b).

Hauptteil

I. Methodik, Vorgehensweise und Projektablauf

Die Herstellung praxisnaher Prototypen setzt eine Überwindung der bisherigen, vertikalen Fertigungslimitierungen voraus. Im Forschungsprojekt wurden zwei Lösungswege für dieses Problem untersucht:

- **Materialmischung:** Durch eine Anpassung der Werkstoffzusammensetzung sollte der innere Zusammenhalt des Materials nach dem Verlassen des Extruders so weit gestärkt werden, dass Objekte mit einer Höhe von mindestens 50 cm gedruckt werden können. Es wurden hierzu verschiedene Möglichkeiten gesichtet, getestet und angepasste Mischungen entwickelt (AP 2 & 3).
- **Segmentbauweise:** Zusätzlich zur Steigerung der Druckhöhe sollte ein Verfahren entwickelt werden, mit dessen Hilfe einzelne additiv gefertigte Segmente form- und kraftschlüssig zu einem Ganzen verbunden werden können (AP 4).

Konkret waren im Verlauf des Forschungsprojektes folgende Arbeitspakete zu bearbeiten:

1. Vergleich **FDM & LDM:** Das LDM-Verfahren mit holzbasierten Materialien erscheint vielversprechend, ist trotz der Vorarbeiten des Antragstellers jedoch noch relativ neu. Das FDM-Verfahren mit WPC-Werkstoffen zählt bereits zum Stand der Technik. Um das Potential

der LDM-Technologie auszuloten bzw. zu demonstrieren, sollten beide Verfahren hinsichtlich Verfahrens-, Material- und Produktparameter miteinander verglichen werden.

2. Screening **Materialverfestigung**: Verschiedene Möglichkeiten zur Beschleunigung der Verfestigung von LDM-Materialien wurden gesichtet und in Vorversuchen getestet. Ziel war ein Materialverhalten, dass es erlaubt, 50 cm hohe Objekte zu fertigen, entweder indem die Paste nach dem Verlassen der Düse schnell aushärtet oder andere Faktoren das Kollabieren verhindern.
3. **Materialentwicklung**: Aussichtsreiche Mischungsvarianten aus AP 2 sollten hinsichtlich Festigkeitsparametern und Schwindungsverhalten untersucht und weiter optimiert werden. Mischungsverhältnisse wurden variiert, Zusammenhänge analysiert und angepasste Materialrezepte definiert. Eine Anregung aus der Praxis aufnehmend wurde in orientierenden Untersuchungen zusätzlich die Feuchtebeständigkeit ermittelt.
4. Entwicklung einer **Segmentbauweise**: Ein intelligentes Verbindungssystem zum Fügen einzelner Segmente sollte entwickelt werden, bei dem bedarfsgerecht unterschiedliche Verbindungstypen zum Einsatz kommen. Dieses Arbeitspaket wurde maßgeblich durch Uwe Bodenschatz (Unterauftrag) bearbeitet.
5. Fertigung eines **Produkt-Prototypen** im Bereich Musikinstrumentenbau in Kooperation mit Uwe Bodenschatz und der Firma „Stefan Beyer Instrumente“ (Großweitzschen), die daran interessiert ist, das Verfahren zukünftig selbst in der eigenen Produktion einzusetzen. Es sollten Zargen von Gitarren samt Verstärkungs- und Anschlusselementen gedruckt werden.

Der Arbeits- und Zeitplan des Projekts ist in Tabelle 1 dargestellt. Er gibt einen Überblick über die durchgeführten bzw. geplanten Aktivitäten, deren zeitliche Abfolge und die Mitwirkung der Kooperationspartner an den verschiedenen Arbeitspaketen.

Tabelle 1: Arbeits- und Zeitplan (UB ... U. Bodenschatz, SB ... S. Beyer Instrumente)

	Quartale				IX	Kooperationspartner
	I-II	III-IV	V-VI	VII-VIII		
AP 1 FDM & LDM						UB
AP 2 Screening Verfestigung						Baufan
AP 3 Materialentwicklung						Baufan
AP 4 Segmentbauweise						UB
AP 5 Prototypenfertigung						UB, SB

II: Projektergebnisse

AP 1: FDM & LDM

Wood Plastic Composites (WPC) zählen in der additiven Fertigung, im Bereich des Fused Deposition Modeling (FDM), zum Stand der Technik. Die Entwicklung von holzbasierten Werkstoffen für das Liquid Deposition Modeling begann erst 2015. Vor diesem Hintergrund war die Frage zu beantworten, wie die beiden Verfahren in einem Vergleich abschneiden.

Verglichen wurden das FDM-Verfahren mit einem kommerziellen WPC-Filament auf der einen und das LDM-Verfahren mit einer Mischung aus Zell-Leim, Wasser und Holzmehl (Gewichtsverhältnis von 1:15:4,5) auf der anderen Seite (Tabelle 2). Der Holzanteil des LDM-Materials liegt bei 82 %. Bei FDM-Filamenten mit Holzanteil fehlen i.d.R. offizielle Herstellerangaben; es kann jedoch grob davon ausgegangen werden, dass diese aus etwa 70 bis 80 % aus thermoplastischen Kunststoffen und maximal zu etwa 20 bis 30 % aus Holzmehl bestehen. Der Kilopreis unterscheidet sich dementsprechend: etwa 90 € bei Kunststoff-Holz-Filamenten stehen etwas mehr als 1 € bei LDM-Mischungen gegenüber. Infolge des hohen Kunststoffanteils zeigen FDM-WPCs höhere Festigkeitswerte als die bisher entwickelten LDM-Materialien.

Tabelle 2: Vergleich der additiven Fertigungsverfahren des Fused Deposition Modeling (FDM) und des Liquid Deposition Modeling (LDM) hinsichtlich Verfahrens-, Material- und Produktparameter

	FDM mit WPC (Drucktemperatur 200°C)	LDM mit Holzwerkstoffen (ZL 1:15:4,5)
Holzanteil	ca. 30 %	82 %
Materialkosten	87,60 €/kg	1,24 €/kg
Druckgeschwindigkeit	80 mm/s	30 mm/s
Düsendurchmesser (-querschnitt)	0,4 mm (0,13 mm ²)	10 mm (78,5 mm ²)
Volumenstrom	0,624 cm ³ /min = 0,0374 dm ³ /h	141,3 cm ³ /min = 8,478 dm ³ /h
Schichthöhe	0,2 mm	5 mm
Druckzeit für 1 dm ³	26,7 h	0,12 h = 7 min
Energiebedarf	1000 W	200 W
Energiebedarf für 1 dm ³	26.709,4 Wh	23,6 Wh
Trockenzeit	-	5 Tage
Schwindung	ca. 1 %	15,9 %
Dichte	0,91 g/cm ³	0,41 g/cm ³
Biegefestigkeit	25,95 MPa	2,35 MPa

Das FDM- ist im Vergleich zum LDM-Verfahren durch einen deutlich geringeren Düsendurchmesser und eine geringeren Schichthöhe gekennzeichnet. Das führt zu einer besseren Objektauflösung und erlaubt damit die Fertigung detailreicherer Objekte. Trotz höherer Druckgeschwindigkeiten bringt dies jedoch einen deutlich geringeren Volumenströmen und längere Druckzeiten beim FDM (> 200-fache Druckzeit) mit sich. Durch das Aufschmelzen des Kunststoffes benötigt das FDM-Verfahren zudem mehr Energie (> 1000-fache Energiebedarf). Das Trocknen der Holzpasten braucht hingegen zusätzlichen Zeitaufwand.

An einem beispielhaften Objekt aus der Möbelherstellung (der Ecke eines Polsterhockers) wurde der Vergleich konkret durchgeführt. Das Objekt hatte im fertigen Zustand eine Grundfläche von 15 x 15 cm und eine Höhe von 5 cm (Volumen: 0,25 Liter). In Anbetracht der Schwindung des LDM-Materials wurde das Objekt hier mit größeren Abmaßen gedruckt werden.

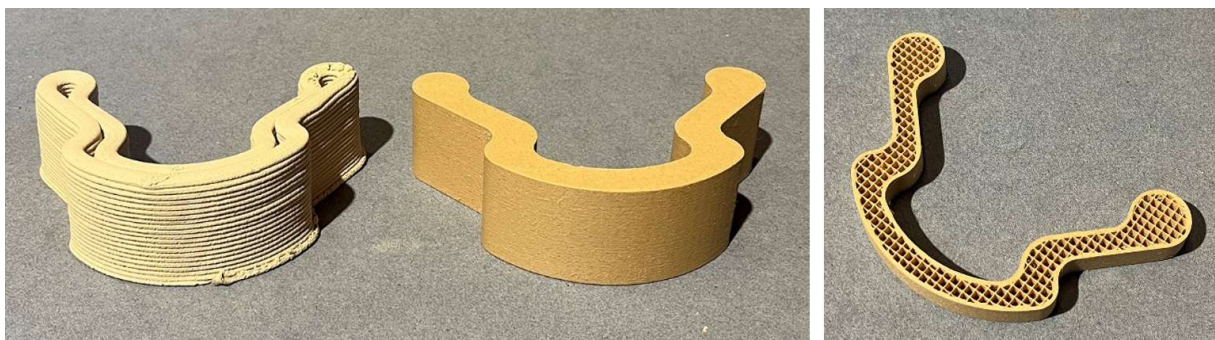


Abbildung 1: Möbelecke hergestellt im LDM- (links) und im FDM-Verfahren (rechts mit Infillstruktur)

Im LDM-Verfahren wurde eine Möbelecke mit dem Tronxy Moore 2 Pro gefertigt. Als Material diente eine Mischung aus Zell-Leim, Wasser und Holzmehl (1:15:4,5). Folgende Druckparameter wurden verwendet:

- Druckgeschwindigkeit: 25 mm/s
- Druckzeit 20 min
- Düsendurchmesser: 8 mm
- Schichthöhe: 4 mm

Die Energiemessung für den 3D-Drucker und den Kompressor „silAir“ zur Druckluftvorspannung des Materials ergab einen Energieverbrauch von 0,012 kWh. Die Lüfterunterstützung (kalt) für die Trocknung des Objekts benötigte 0,28 kWh.

Das gleiche Objekt wurde auch im FDM-Verfahren realisiert. Hierbei wurde das WPC-Filament „Wood“ (PLA/Holz) des österreichischen Herstellers „Extrudr“ und der 3D-Drucker Zortrax M200 verwendet.

- Druckgeschwindigkeit: 36 mm/s
- Druckzeit 5 h, 59 min
- Düsendurchmesser: 0,4 mm
- Schichthöhe: 0,19 mm
- Infill: 50 %
- Extrudertemperatur: 170°C
- Temperatur Druckbett: 30°C

Als Energiebedarf ergaben sich hier 0,559 kWh.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass holzbasierte Materialien sowohl im FDM- als auch im LDM-Verfahren eingesetzt werden können. Spielen Detailgrad und Festigkeit eine maßgebliche Rolle ist der FDM-3D-Druck mit WPC zu empfehlen. Ökologische Gesichtspunkte, wie der deutlich höhere Holzanteil und der geringere Energiebedarf sind Vorteile des LDM-Verfahrens. Hinsichtlich des Zeitbedarfs fällt beim FDM insbesondere die um ein vielfaches längere Belegungszeit des 3D-Druckers auf, wohingegen beim LDM-Verfahren im Nachgang mehrere Tage Trocknungszeit zu Buche schlagen. Inwiefern die entsprechenden Vor- und Nachteile jeweils stärker ins Gewicht fallen, muss letztlich in Bezug auf die konkreten Anwendungen geklärt werden.

AP 2: Screening Verfestigung

Zu den Materialien, bei denen ein gewisses Potential gesehen wurde, zu einer schnelleren Festigkeitsentwicklung von LDM-Pasten beizutragen, gehören Knochenleim und schnellhärtende mineralische Bindemittel. Diese und weitere Materialien wurden in Vorversuchen auf ihre Eignung hin getestet.

Knochenleim

Sowohl Glutin- oder Knochenleim als auch Haushaltsgelatine lässt man in Wasser quellen, erhitzt diese auf 50 bis 65°C und kann sie dann weiterverarbeiten. Im Zuge der Abkühlung verfestigt sich die Flüssigkeit. Es sollte geprüft werden, ob eine Beimischung von Knochenleim zu einer holzbasierten Paste eine Option für eine schnelle Erhöhung der Viskosität darstellt.

Nach zahlreichen Vorversuchen konnte das Masseverhältnis für eine druckfähige Mischung aus Zell-Leim (Baufan), Knochenleim, Wasser und Holzmehl (Westerkamp, Lignobest C200) formuliert werden: ZL:KL:W:H = 1:2:13:3,7. Es wurde erfolgreich ein Prüfkörper im 3D-Druck gefertigt (Abbildung 2).



Abbildung 2: 3D-gedruckter Prüfkörper der Mischung ZL:KL:W:H = 1:2:13:3,7 zur Bestimmung der Materialschwindung

Dieser Test zeigte, dass es prinzipiell möglich ist, unter Verwendung von Knochenleim druckbare pastöse Massen herzustellen. Die Schwindung in vertikaler Richtung (im Zuge der Trocknung) lag zwar bei einem relativ hohen Wert von 28,2 %, hier gibt es jedoch noch gewisse Optimierungsmöglichkeiten.

Problematisch dagegen ist, dass sich die Erwartungen hinsichtlich einer beschleunigten Verfestigung nicht erfüllt haben: reiner, in Wasser gelöster Knochenleim wird bei einer Abkühlung von 60°C auf 20°C fester. In Verbindung mit den anderen Mischungskomponenten Zell-Leim und Holzmehl ist diese Viskositätserhöhung jedoch nicht mehr spürbar. Daran ändert sich auch in den folgenden Stunden nach der Extrusion nichts Wesentliches. Erst nach einer Woche ist das Material ausgehärtet. Diese Zeitspanne ist zu lang, um während des etwa einstündigen Druckprozesses einen deutlichen Festigkeitszuwachs zu erzielen. Die Verwendung von Knochenleim wurde deshalb nicht weiterverfolgt.

Mineralische Bindemittel

Mineralische Bindemittel (z.B. Calciumsulfat, Calciumsulfoaluminat) haben den Vorteil, dass es im Verlauf von Minuten zu einer Aushärtung des Materials kommt. Es sollte geprüft werden, ob dies auch in einer Mischung mit Holz der Fall ist. In Vorversuchen wurde eine Reihe verschiedener Bindemittel getestet:

- Calumex UPC White von CALTRA Nederland B.V.
- RAPID SET® CEMENT der CTS Cement Manufacturing
- CEM I 42,5 R der Heidelberg Materials AG
- i.tech ALIPRE der Heidelberg Materials AG
- Next base SR03 von Buzzi Unicem

Calumex UPC White und RAPID SET® CEMENT mussten aus den weiteren Versuchen ausgeschlossen werden, da sie trotz geringer Wasserzugabe zu dünnflüssig waren.

Nach DIN EN 196-3 wurden die Erstarrungszeiten der drei verbliebenen (jeweils mit Wasser angerührten) Bindemittel bestimmt. Der Erstarrungsbeginn kennzeichnet den Zeitpunkt, an welchem der Tauchstab des sogenannten Vicat-Messgerätes innerhalb eines 40 mm hohen Zylinders, der mit der Materialmischung gefüllt ist, 6 mm über dem Boden steckenbleibt. Das Erstarrungsende ist erreicht, wenn ein ringförmiger Ansatz an der Nadel keinen Abdruck auf der Materialoberfläche hinterlässt (die Eindringtiefe beträgt dann nur noch maximal 0,5 mm).

Die ermittelten Erstarrungszeiten sind in Tabelle 3 aufgeführt. Aufgrund zu langsamer Erstarrung wurde CEM I 42,5 R (Heidelberg) für die geplante Anwendung ausgeschlossen.

Tabelle 3: Überblick über die Erstarrungszeiten der mineralischen Bindemittel

	Erstarrungsbeginn [min]	Erstarrungsende [min]
CEM I 42,5 R (Heidelberg)	180	-
i.tech ALIPRE (Heidelberg)	24	37
Next base SR03 (Buzzi Unicem)	10	15

Im nächsten Schritt wurden Mischungen entwickelt, die neben dem mineralischen Bindemittel auch Holzmehl (Lignobest C200, Holzmühle Westerkamp) als Füllstoff enthalten. Um ein pastöses, extrudierbares Material zu erhalten, war die Zugabe einer gewissen Menge an Carboxymethylcellulose (Zell-Leim, Baufan Bauchemie) zum Anmachwasser nötig. Tabelle 4 zeigt die Materialrezepturen mit i.tech ALIPRE (Heidelberg).

Tabelle 4: Materialrezepturen mit i.tech ALIPRE (Heidelberg) und Holzmehl Lignobest C200 (Westerkamp)

Bezeichnung	Wasser [g]	Zellleim [g]	Holzmehl C200 [g]	i.tech ALIPRE [g]	Anteil BM-pulver an Trockenmasse [%]	Anteil Holzmehl an Trockenmasse [%]	Anteil Zellleim an Trockenmasse [%]
75_i.t_M	42,25	2,37	9,23	34,79	75,00	19,90	5,10
90_i.t_M	39,82	1,81	5,46	65,47	90,00	7,51	2,49

Durch die Zumischung von Holzmehl verlängerte sich der Erstarrungsbeginn bei i.tech ALIPRE (Heidelberg) um mehr als das drei- (90_i.tech) bzw. fünffache (75_i.tech). Deshalb wurde auch dieses Bindemittel ausgeschlossen.

AP 3: Materialentwicklung

Beschleunigung der Aushärtung

Für die auf die Screening-Versuche aufbauende Materialentwicklung erschien das mineralische Bindemittel Next base SR03 von Buzzi Unicem am aussichtsreichsten. Es wurden Mischungen mit unterschiedlichen Holzanteilen entwickelt (Tabelle 5). Verwendung fanden das Nadelholzmehl Lignobest C200 der Holzmühle Westerkamp und Nadelholzspäne der HS Timber Productions in Kodersdorf (Partikelgröße 200-400 µm).

Tabelle 5: Materialrezepturen mit Next base SR03 (nex) und Holzmehl Lignobest C200 (M) bzw. Sägespänen (S)

Bezeichnung	Wasser [g]	Zellleim [g]	Next base [g]	Holzmehl C200 [g]	Sägespäne [g]	Aluminiumsulfat Hydrat [g]	Natronwasserglas [g]	Anteil Next base an Trockenmasse [%]
50_nex_M	46,63	3,11	14,80	11,68	-	0,3038	0,3038	50
60_nex_M	47,33	3,16	21,10	10,91	-	0,2837	0,2837	60
75_nex_M	49,06	3,27	36,78	8,99	-	-	-	75
90_nex_M	53,05	3,54	72,88	4,56	-	-	-	90
50_nex_S	46,16	3,08	10,54	-	7,46	0,1940	0,1940	50
75_nex_S	48,10	3,21	28,06	-	6,15	0,1598	0,1598	75
90_nex_S	51,95	3,46	62,92	-	3,53	-	-	90

Eine Erhöhung des Holzanteils ergab auch hier eine Verlängerung der Erstarrungszeiten (Tabelle 6). Als Ursache dafür wurde die Peeling-Reaktion beim Holz in stark basischen Lösungen identifiziert: Cellulosemoleküle werden von ihren Enden her aufgespalten. Es gehen Holzzucker in Lösung. Diese

Reaktion verzögert bei mineralisch gebundenen Holzwerkstoffplatten das Abbinden erheblich. Durch eine Vorbehandlung des Holzmehls mit den Inhibierungsregulatoren Aluminiumsulfat und Wasserglas konnte die Zugänglichkeit der Holzoberfläche eingeschränkt und die Peeling-Reaktion vermindert werden. Dadurch kommen im Rahmen der Materialentwicklung Rezepturen in Frage, bei denen der Anteil des mineralischen Bindemittels auf 50 bzw. 60 % beschränkt ist.

Tabelle 6: Erstarrungszeiten der Materialrezepturen auf Basis Next base SR03 (nex) und Holzmehl Lignobest C200 (M) bzw. Sägespänen (S)

	Erstarrungsbeginn ohne Inhibitor [min]	Erstarrungsende ohne Inhibitor [min]	Erstarrungsbeginn mit Inhibitor [min]	Erstarrungsende mit Inhibitor [min]
Next base	10	15	-	-
90_nex_M	29	51	-	-
75_nex_M	63	155	-	-
60_nex_M	-	-	70	150
50_nex_M	150	360	120	300
90_nex_S	32	70	-	-
75_nex_S	76	270	65	180
50_nex_S	300	-	240	-

Die maximal mögliche Druckhöhe wird stark von der Aufbaubarkeit (*Buildability*) des pastösen Holzwerkstoffs beeinflusst. Als Aufbaubarkeit bezeichnet man bei der additiven Fertigung die Fähigkeit des abgelegten Materials, nach der Extrusion durch die Düse die Last nachfolgender Schichten zu tragen und dabei seine Form beizubehalten (Zhang et al. 2021, Zhong & Zhang 2022). Zur Messung dieser Eigenschaft wurde ein Druckversuch genutzt, bei dem ein Hohlzylinder, kurz nachdem er additiv gefertigt wurde, vertikal mit einem konstanten Gewicht belastet wurde (vgl. Nguyen-Van et al. 2022). Das Gewicht (m_L) entspricht dabei der Last, die auf den unteren Bereich eines Druckobjektes der Höhe x (h_x) wirken würde. Dieses ist sowohl von der Höhe (h_z) als auch dem Gewicht (m_z) des zylindrischen Prüfkörpers abhängig:

$$m_L = m_z \times \frac{(h_x - h_z)}{h_z}$$

Die belastungsbedingte vertikale Deformation des Prüfkörpers wird als Grünstauchung (*green compressive strain*) bezeichnet. Die Druckbelastung wurde 45 min nach dem Beginn der Hydratationsreaktion der Materialmischung gestartet. Die Belastung erfolgte über einen Zeitraum von 20 min. Zum Schluss wurde der in Abbildung 3 dargestellte Stauchungswert ermittelt.

Vorausgegangene Versuche hatten gezeigt, dass unter Verwendung der Referenzmischung ZL 1:15:4,5 Druckobjektive mit einer Höhe von 20 cm reproduzierbar gefertigt werden können, Druckhöhen von 50 cm jedoch zum Kollabieren führen (Bodenschatz & Rosenthal 2024). Die Grünstauchung liegt für diese Mischung bei 6 % ($h_x = 20$ cm) bzw. 17 % ($h_x = 50$ cm). Bei den vier getesteten Materialrezepturen mit Next base SR03 ergab sich für eine Belastung, die einer Objekthöhe von 50 cm entspricht, einmal ein Wert von 16,6 % (50_nex_S). Die Werte der anderen drei Rezepturen lagen um 6 %. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Mischungen 50_nex_M, 60_nex_M und 75_nex_S über eine Aufbaubarkeit verfügen, die Druckhöhen von mindestens 50 cm ermöglicht.

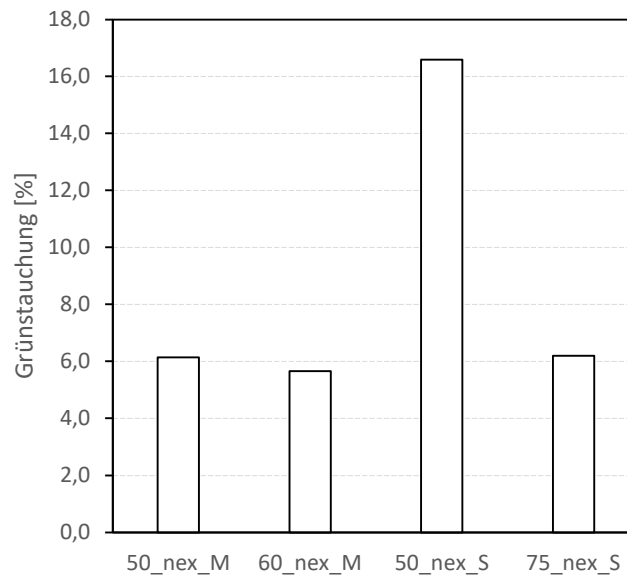


Abbildung 3: Grünstauchung der unteren Objektschichten bei einer Last, die einer Objekthöhe von 50 cm entspricht (n = 2)

Als weitere physikalischen Materialeigenschaften wurden die Schwindung der Druckobjekte in z-Richtung (vertikal), die Dichte und die Druck- und Biegefestigkeit (analog der in Rosenthal et al. (2023a) beschriebenen Methoden) ermittelt (Tabelle 7). Im Hinblick auf die Anwendung sind sowohl eine geringe Schwindung als auch eine hohe Festigkeit von Vorteil. Mit zunehmendem Anteil des mineralischen Bindemittels sank die Schwindung. Die Mischung 75_nex_S erreichte mit 6,1 % die niedrigsten Schwindungswerte. Die höchsten Festigkeitswerte finden sich sowohl für die Druckbelastung (7,8 MPa) als auch für die Biegebeanspruchung (5,8 MPa) bei der Mischung 50_nex_M. Mischungen mit dem feineren Holzmehl als Füllstoff weisen höhere Werte auch auf als jene mit den gröberen Sägespänen. Bei der Biegefestigkeit zeigt sich ein positiver Einfluss des Holzanteil in der Mischung.

Tabelle 7: Schwindung (n = 2), Rohdichte (n = 20), Druck- (n = 20) und Biegefestigkeit (n = 7) der schnellhärtenden Holzleichtbetonmischungen

	Vertikale Schwindung [%]	Rohdichte [g/cm³]	Druckfestigkeit [MPa]	Biegefestigkeit [MPa]
50_nex_M	17,2 ± 0,5	0,778 ± 0,029	7,83 ± 1,71	5,79 ± 0,32
60_nex_M	12,3 ± 0,6	0,798 ± 0,028	7,36 ± 0,50	4,80 ± 0,63
50_nex_S	18,7 ± 0,4	0,634 ± 0,021	4,31 ± 0,68	3,22 ± 1,84
75_nex_S	6,1 ± 0,2	0,781 ± 0,018	4,20 ± 0,72	2,66 ± 0,68

Feuchtebeständigkeit

Eine Anregung aus der Industrie aufnehmend sollte die Feuchtebeständigkeit holzbasierter Mischungen in orientierenden Untersuchungen getestet werden. Im konkreten Anwendungsfall geht es um Transportpaletten, die einige Tage der Witterung ausgesetzt sein können.

Prüfkörper, die aus den mineralisch gebundenen Mischungen hergestellt wurden, nehmen in den ersten 24 Stunden größere Mengen Wasser auf (Abbildung 4). Eine erste qualitative Beurteilung ergab jedoch keine deutliche Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften im Vergleich zum trockenen, ausgehärteten Zustand.

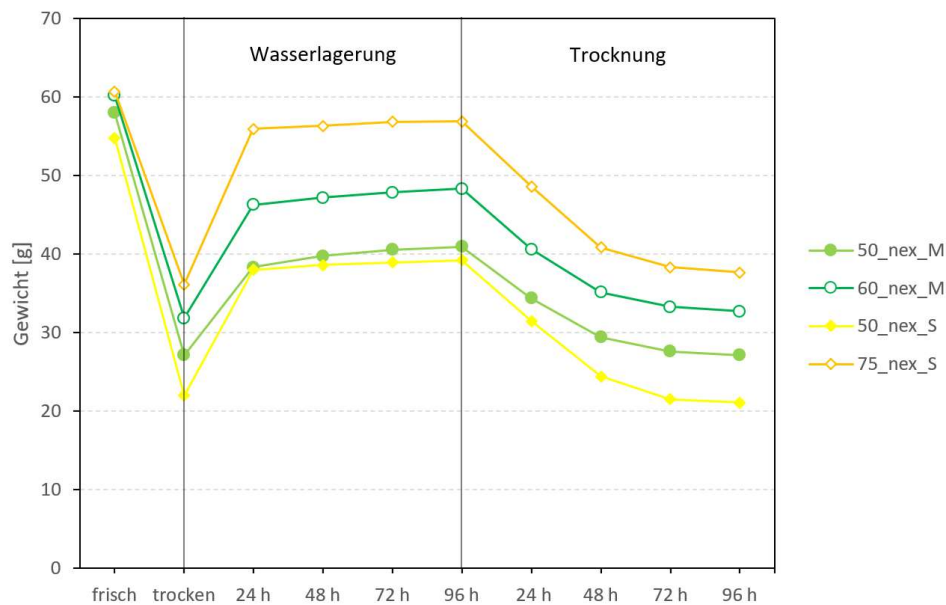


Abbildung 4: Gewichtsverlauf der Holzleichtbetonmischungen bei Wasserlagerung und anschließender Trocknung

Da Transportpaletten eine geringe Objekthöhe besitzen, sind die Anforderungen an die Aufbaubarkeit hier begrenzt. Stattdessen stehen Gewicht und Preis als Anforderungen im Vordergrund. Deshalb wurden zusätzlich drei leichtere Materialmischungen ohne Mineralanteil getestet. Als Bindemittel wurden dabei ein Methylcellulosederivat (MC), Carboxymethylcellulose (CMC) und Natriumalginat (Alg) verwendet; als Füllstoff kam in allen drei Mischungen das Holzmehl Lignobest C200 der Holzmühle Westerkamp zum Einsatz. Nach dem Trocknen des Materials erfolgte eine nachträgliche Oberflächenbehandlung (Pinselauftrag) mit einem Hydrowax, Rapsöl, einem Leinöl-basierten Holzöl und Silikonöl.

Nach erneuter Trocknung wurde bei einer anschließenden Wasserlagerung das Verhalten der Proben qualitativ beurteilt. Die CMC-Prüfkörper waren trotz Hydrophobierung nach vierstündiger Wasserlagerung vollständig aufgeweicht und zerfielen bei einer leichten mechanischen Belastung. Der MC-Prüfkörper, der mit Hydrowax behandelt wurde, war nach vier Stunden im Kern noch relativ fest; alle anderen MC-Prüfkörper zerfielen. Der Alg-Prüfkörper ohne Hydrophobierung war nach vier Stunden im Wasser im Kern ebenfalls noch fest (oberflächlich hatte sich jedoch Material ablöst); die Hydrophobierung brachte keine deutliche Verbesserung. Bei allen 12 getesteten Bindemittel-Hydrophobierungsvarianten war nach einer 24-stündigen Wasserlagerung ein Aufweichen des Prüfkörpers bis in den Kern festzustellen, sodass eine Verwendung im Außenbereich nicht möglich ist.

Da die getesteten Hydrophobierungsmittel einen nur sehr begrenzten Effekt zeigten, wurde im Rahmen einer Literaturrecherche nach alternativen Lösungen gesucht. Sauerwein et al. (2020) beschreiben eine Nachbehandlung für Natriumalginat-gebundene Massen mit einer Calciumchlorid-Lösung. Das Alginat wird durch einen Kationenaustausch vernetzt (sogenanntes „Eierschachtel-Modell“), wodurch eine wasserunlösliche Calciumalginat-Oberfläche entsteht.

Erste Test waren vielversprechend. Die getrockneten NaAlg-Prüfkörper wurden für 10 min in einer 2-prozentigen CaCl_2 -Lösung getränkt und danach erneut für einen Tag getrocknet. Um die Wirkung der Kationenaustauschs zu testen, wurden die Prüfkörper in Wasser gelagert. Auch nach fünf Tagen Wasserlagerung war kein Aufweichen des Materials feststellbar. Die vorläufigen Ergebnisse stimmen zuversichtlich, dass aufbauend auf dieses Verfahren eine Feuchtebeständigkeit biobasierter Mischungen erreicht werden kann. In einem Folgeprojekt sollen diese Untersuchungen fortgesetzt und ein auf die Anforderungen des Unternehmens angepasster Verfahrensablauf entwickelt werden.

AP 4: Segmentbauweise

Unabhängig von einer Steigerung der Druckhöhe durch die neu entwickelten Materialmischungen war es Ziel des Projektes, ein Verfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe auch kleinere additiv gefertigte Segmente form- und kraftschlüssig zu einem Ganzen verbunden werden können.

Als Objekt diente die bereits in AP 1 erwähnte Ecke eines Polsterhockers (Grundfläche 15 x 15 cm). Bei einer Begrenzung der Druckhöhe auf 15 bis 20 cm müssen drei dieser Ecken in vertikaler Richtung miteinander verbunden werden, um die Zielhöhe des Objektes zu erreichen. Bei der Konstruktion wurden vier Bereiche eingeplant, die der Aufnahme von Dübeln bzw. Rundstangen dienen sollten; sie ergaben sich aus dem Verlauf der erzeugten Druckbahnen, welche im Vasenmodus spiralig an der Außenwand des Körpers entlanglaufen (Abbildung 5).

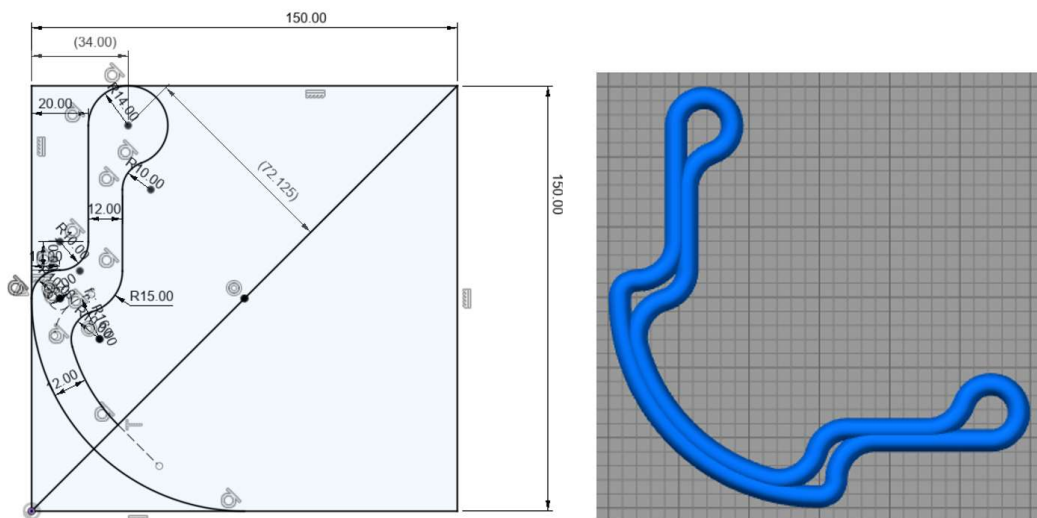


Abbildung 5: Möbelecke als Konstruktionszeichnung (links) und virtuelle Darstellung der Druckbahnen (rechts)

Die Fertigung der Segmente erfolgte analog AP 1 mit einem modifizierten Tronxy Moore 2 Pro im LDM-Verfahren (Abbildung 6). Der Düsendurchmesser betrug 8 mm, die Schichthöhe 4 mm. Die Druckgeschwindigkeit lag bei 25 mm/s.

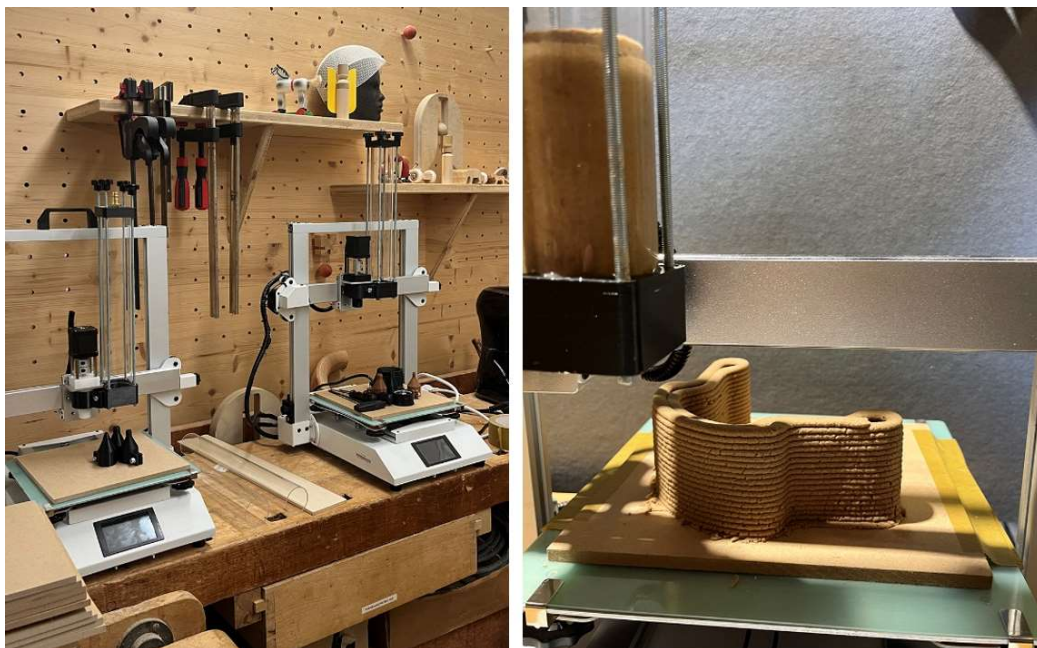


Abbildung 6: Versuchsaufbau für den LDM-Druck (links), Druckvorgang des Prüfkörpers (rechts)

Bei der Fertigung der Elemente muss die Schwindung der Objekte während der Trocknung, mit der ein gewisser Verzug verbunden ist, berücksichtigt werden. Die Geometrieabweichung wurde erfasst und in den digitalen Objektentwurf eingerechnet, so dass sich beim fertigen Objekt die gewünschte Geometrie ergibt (Abbildung 7).

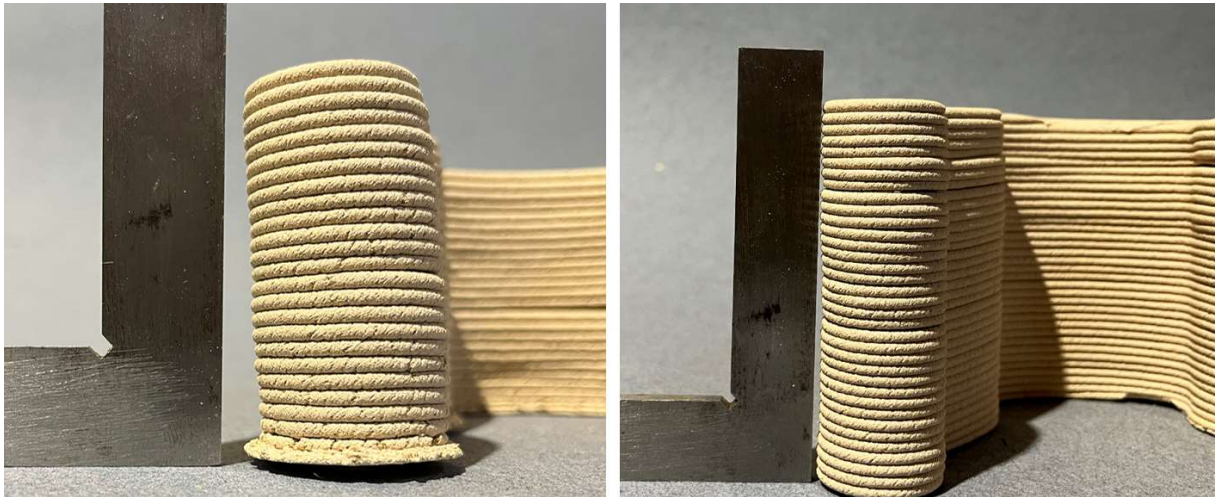


Abbildung 7: Seitliche Schenkel der Möbelecke vor (links) und nach (rechts) Geometriekorrektur

Die vier Bereiche für die Dübel bzw. Rundstangen wurden mithilfe einer Bohrschablone und einem Schlangenbohrer auf das exakte Maß von 8 mm aufgebohrt (Abbildung 8, links).

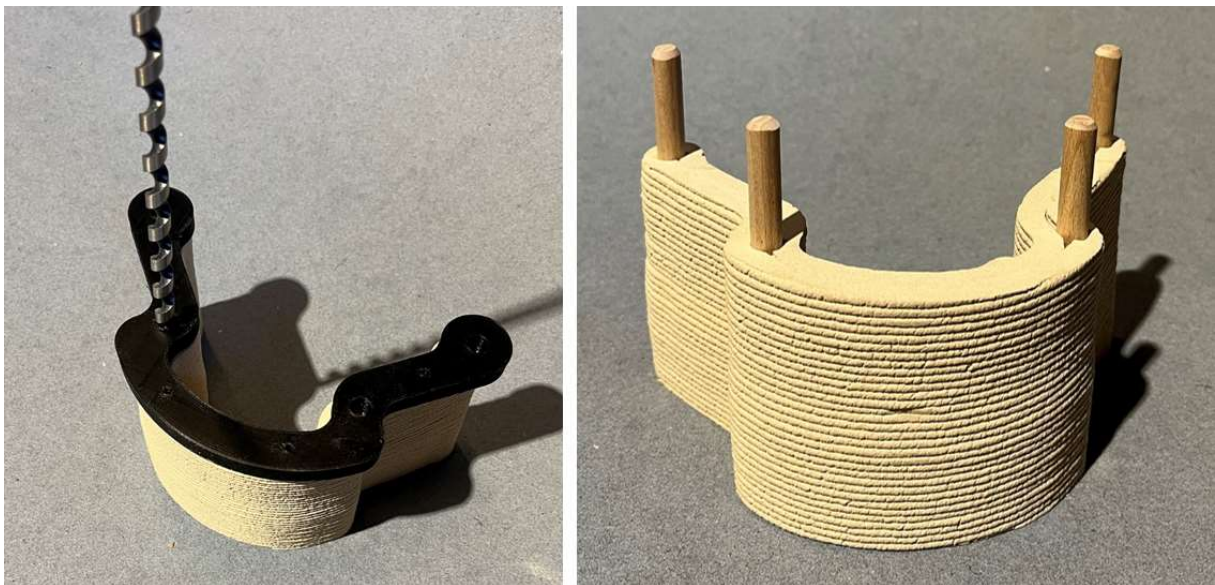


Abbildung 8: Aufbohren mit Bohrschablone und Schlangenbohrer (links), Dübel in der Möbelecke befestigt (rechts)

Als Verbindungselemente kamen Dübel (Abbildung 8, rechts) und Rundstäbe aus Buchenholz zum Einsatz. Sie konnten passgenau eingesetzt werden, wodurch sich die Segmente exakt übereinander positionieren ließen (Abbildung 9).

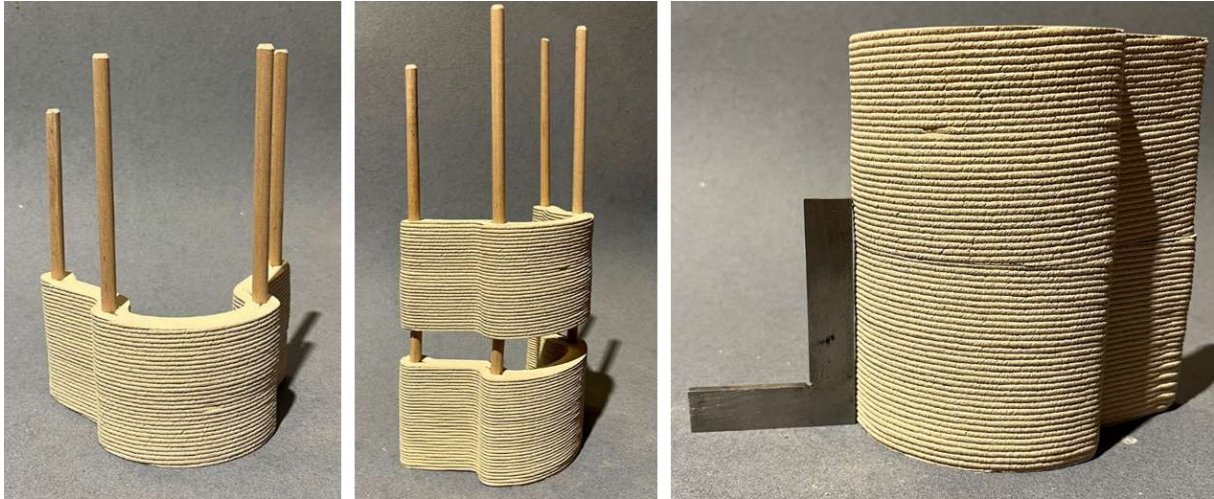


Abbildung 9: Hohes Maß an Passgenauigkeit durch ein Auffädeln der gedruckten Körper auf Rundstangen

Eine alternative Möglichkeit, dem Verzug der Körper entgegenzuwirken, ist eine direkt nach dem Drucken eingesetzte Haltevorrichtung, die die späteren Anschlusspositionen exakt definiert (Abbildung 10). Eine Platte mit eingesetzten Rundstäben ist hierbei in die noch feuchte Masse einzubringen.

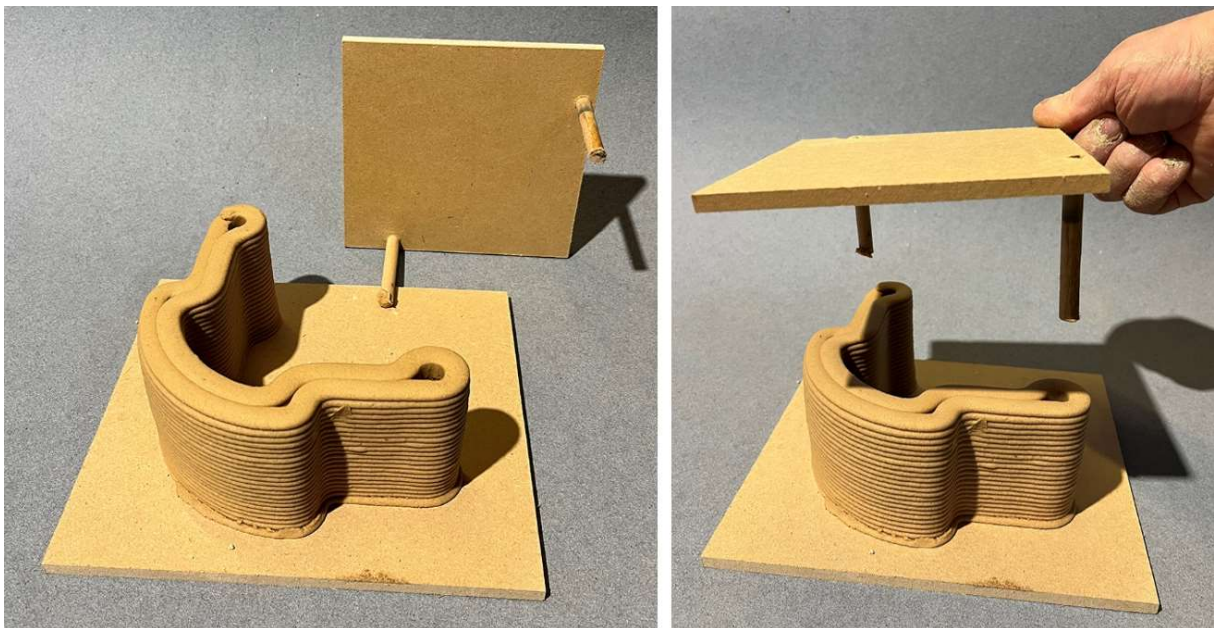


Abbildung 10: Noch feuchter Körper mit Haltevorrichtung, die der Geometriestabilisierung während der Trocknung dient

Eine Segmentbauweise kann nicht nur eingesetzt werden, um niedrige Körper in vertikaler Richtung zu verbinden. Auch in der horizontalen Ebene kann es sinnvoll sein, mehrere Objekte zu kombinieren, insbesondere dann, wenn aus Effizienzgründen mehrere 3D-Drucker mit begrenztem Bauraum parallel betrieben werden, die Objekte aber größere Abmaße aufweisen müssen. Mit diesem Anwendungsfall trat ein Unternehmen an die Projektbearbeiter heran, das für die Fabrikationsstraßen von Automobilbauern mithilfe verschiedener subtraktiver Fertigungsverfahren aus Holzwerkstoff-Platten Ladungsträger herstellt. Um kleine Autoteile (z.B. Sensoren, Schalter, Schrauben) aufzunehmen, sind diese Verfahren aufgrund der geringen Materialeffizienz jedoch unrentabel. Im Rahmen orientierender Versuche wurden verschiedene Elemente entwickelt, die, nach dem Trocknen formatiert, über ein Schienensystem als variable Module (Grundfläche 15 x 15 cm) in das bestehende Ladungsträgersystem integriert werden können.

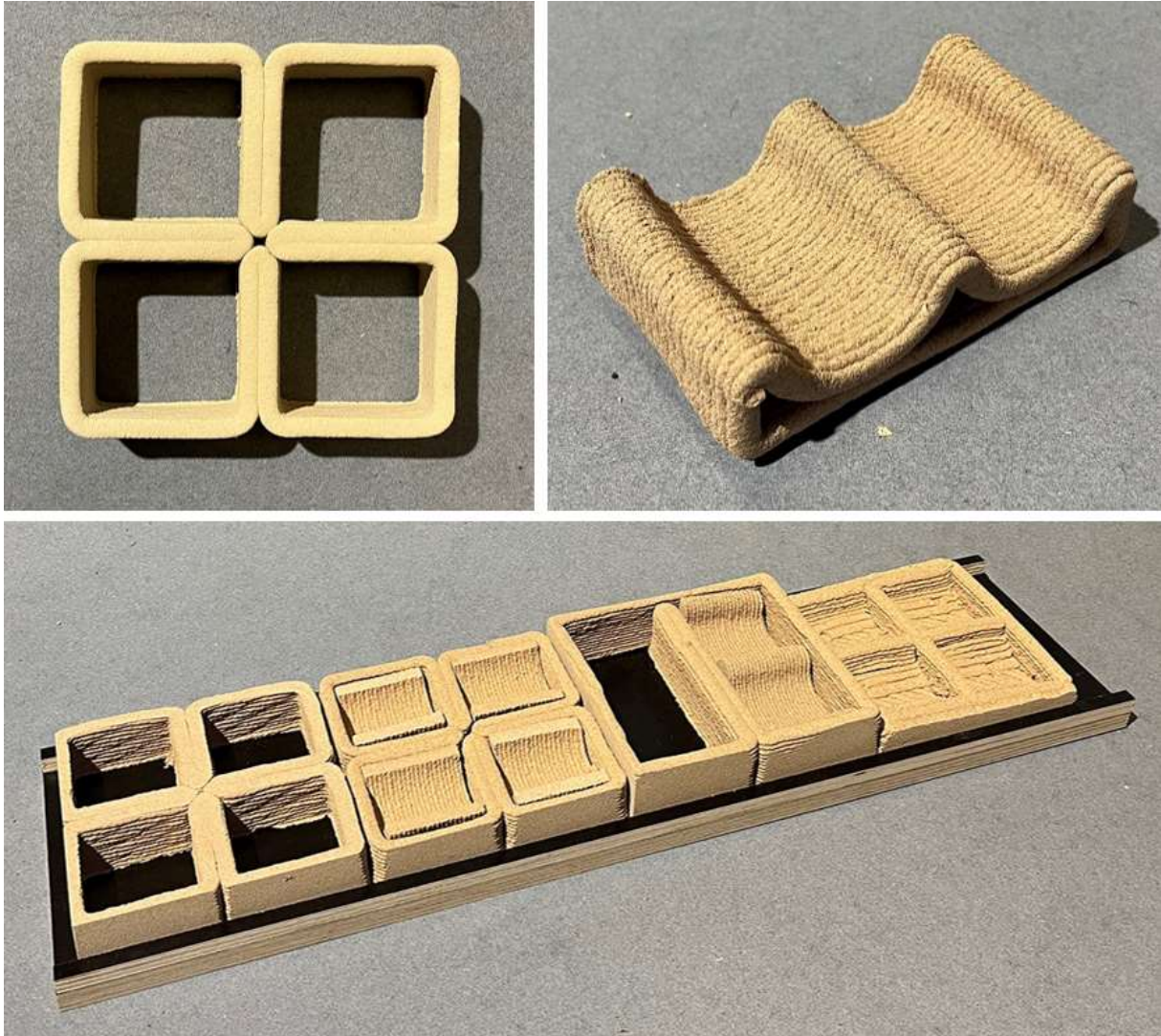


Abbildung 11: Module (oben links), Mulden (oben rechts) als Rohteile nach dem Trocknen und formatierte Module mit eingelegten Mulden zur Aufnahme von kleineren Elementen in Multiplex-Schiene (unten)

AP 5: Prototypenfertigung

In Kooperation mit der Firma „Stefan Beyer Instrumente“ (Großweitzschen) sollte ein Produkt-Prototyp im Bereich Musikinstrumentenbau additiv gefertigt werden. Bei der besonderen pseudoakustischen Funktionsweise der Instrumente wird in den Zargenraum ein Lautsprecher samt Verstärker eingebaut, der ein von weiteren Geräten unabhängiges elektronisches Spielen der Gitarren ermöglicht. Die Zargen müssen dafür relativ voluminös und stabil gebaut sein. Das additive Fertigungsverfahren kann hier perspektivisch sowohl eine ökologisch sinnvollere Alternative ermöglichen, als auch eine größere Formenfreiheit bei geringem Gewicht bieten. Eine Herausforderung bei der alternativen Herstellung stellt 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 und stellte eine zweidimensionale Zeichnung der Standardbauweise inklusive innerer Strukturen zur Verfügung. Mithilfe der Konstruktionssoftware „Autodesk fusion360“ erfolgte die Prozessoptimierung des Entwurfes, u.a. wurden die Kurvenradien und die Breite der Druckbahnen angepasst. Abbildung 12 gibt einen Überblick über die Entwicklungsschritte von der Skizze bis zum mehrstufigen Zargenkörper.

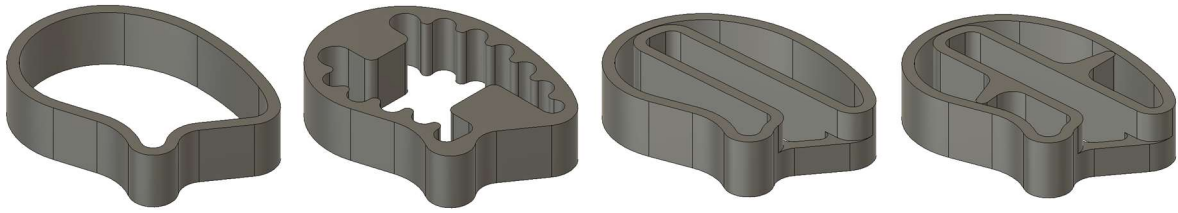


Abbildung 12: Entwicklungsreihe der Zargenformen

Die ursprüngliche Fertigungsstrategie zielte auf einen Druck mit endloser Druckbahn ab. Hierbei wird eine einzige Druckbahn spiralförmig ohne Unterbrechung auf sich selbst abgelegt (sogenannter Vasenmodus). Auf diese Weise sollte die sonst notwendige Nahtstelle beim schichtweisen Aufbau vermieden werden. Ebenso ist dies die am stärksten materialsparende Konstruktionsweise hinsichtlich Gewicht und Nettogröße des Resonanzraumes.

In einem Vorprojekt wurde eine einwandige Ausführung getestet. Diese war mit Stabilitätsproblemen im Bereich langer, relativ gerader Wandbereiche verbunden, in denen die Druckqualität inakzeptabel war (Abbildung 13). Langgestreckte Kurven oder Geraden über ca. 15 cm Länge neigen zur Instabilität während des Druckvorganges und in der Nassphase. Dies kommt besonders im sogenannten Vasenmodus mit endlos einbahniger Hülle zum Tragen.

Der 3D-Druck erfolgte auf Grundplatten, die mit Stretchfolie bespannt wurden (Abbildung 13, links). Diese wurden nach dem Drucken rundum aufgeschnitten, um ein Rutschen des Objektes auf der Grundplatte während der Schrumpfphase zu ermöglichen.



Abbildung 13: Einbahnige, im Vasenmodus gefertigte Zarge mit Qualitätsproblemen im Bereich langer, relativ gerader Wandbereiche

Zur Verbesserung der Stabilität wurde im nächsten Schritt eine doppelwandige Ausführung gewählt. Nachteilig im Vergleich zum Vasenmodus ist, dass es beim mehrbahnigen Verfahren zur Bildung einer sichtbaren Naht mit Materialanhäufung kommt, die sich im schlechtesten Fall während des Trocknens öffnet. Jedoch wurde die Naht im Bereich der Verbindung zum Gitarrenhals ausgeführt (Abbildung 14, links), wodurch sie im fertigen Instrument kaum sichtbar ist. Druckqualität und Wandstabilität erwiesen sich als zufriedenstellend. Im Anschluss wurde das Objekt, wie die übrigen auch, mittels Kaltluftgebläse getrocknet (Abbildung 14, rechts).

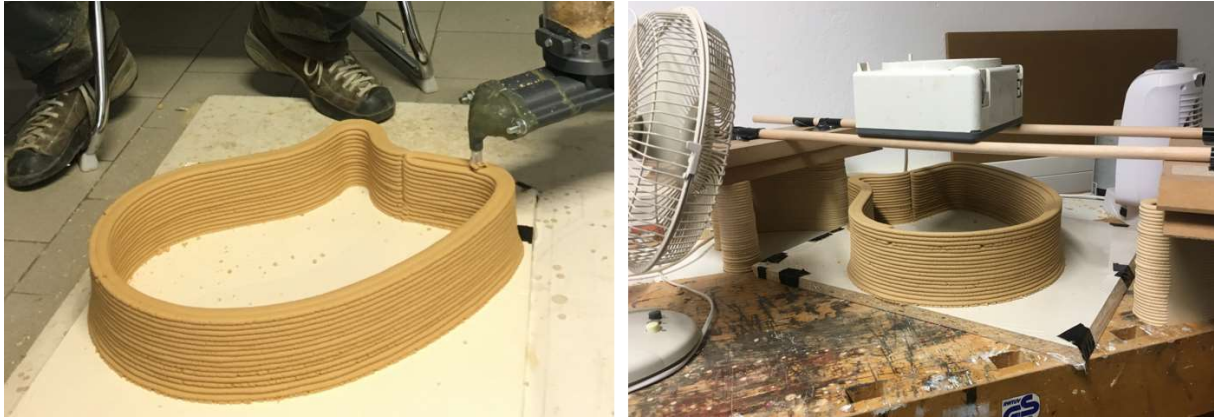


Abbildung 14: Zweibahnige Zarge mit Naht im Halsbereich

Nachdem bisher nur die Außenhülle gefertigt worden war, sollten in die nächsten Entwürfe innere Versteifungselemente integriert werden. Die erste Variante sah eine wellenförmige Innenbahn vor. Die in der Nassphase vorhandene Verbindung zwischen Außenhülle und innerer Stützstruktur blieb jedoch nicht stabil; beim Schwinden kam es zur fast vollständigen Lösung von Innen- und Außenwand (Abbildung 15). Die Kästen an den kurzen Seiten dienen der Hals- und Saitenhalteraufnahme.



Abbildung 15: Zweibahnige, im Vasenmodus gefertigte Zarge mit wellenförmiger, innerer Stützstruktur

Der beiden letzten Entwürfe besaßen eine doppelte Außenhülle. Dies ermöglichte eine hinreichende Stabilität der Kurvenwand bei reduzierten Versteifungsstrukturen. Die zwei Bahnen stabilisierten sich gegenseitig und verhinderten so eine starke Verformung. Nachteilig sind die längere Trocknungszeiten (ca. zwei Wochen) und ein höheres Gewicht. Es muss eine weitere Anhäufung von Material bei den Kontaktpunkten vermieden werden (es ist eine vierfache Bahn bei der dem Hals gegenüberliegenden Stelle vorhanden). Die Geometrie im Innern orientiert sich an den technischen Funktionen. Bereits beim Druck wurde der Absatz für die Aufnahme des Gitarrenhalses ausgespart (Abbildung 16, rechts). Die inneren Längsstrukturen können für die Aufnahme des im Schallloch befindlichen Lautsprechers passend ausgefräst werden. Seitliche Verstärkungsarme stützen die Seitenwände und erhalten somit dort die gewünschte Geometrie.



Abbildung 16: Zweibahnige Zargen mit funktionaler Innenstruktur

In mehreren Iterationsschritten wurde eine Gitarrenzarge entwickelt und additiv gefertigt, die die Anforderungen des Unternehmens erfüllt. Dieser Rohling wurde auf einer Abrichthobelmaschine plan zugerichtet und auf der Tischkreissäge rundum parallel auf 65 mm Höhe zugesägt. Die Außenabmessungen der Zarge betragen ca. 320 mm x 480 mm. Auch die Anschlussstelle des Gitarrenhalses wurde überarbeitet und kleinere zusätzliche Aussparungen im Inneren erzeugt. Die Zarge wurde mit einem Deckel versehen. Dieser besteht aus einem Plattenmaterial aus recycelten Textilien (Jeansfasern), wodurch sich ein stimmiger farblicher Kontrast zum Holzwerkstoff ergibt (Abbildung 17). Für die Zwischenstufe des Prototyps wurden die Öffnungen für Einbauten wie Tonabnehmer und Gitarrenhals auf einer CNC Fräse in die Platte gefräst. Die Platte wurde dann grob zugeschnitten, auf den gedruckten Körper geklebt und mit einem Fräser mit Anlaufkugellager bündig zur Zarge abgefräst. Der gedruckte Körper diente dabei als Anschlag. Die beiden Kooperationspartner planen, die Zarge in weiteren Arbeitsschritten zum spielfähigen Instrument fertigzustellen und die akustischen Eigenschaften mit der herkömmlichen Bauweise zu vergleichen.



Abbildung 17: Additiv gefertigte Zarge mit Deckel und eingepasstem Gitarrenhals

III. Öffentlichkeitsarbeit, Veröffentlichungen, Vorträge

Um die Projektergebnisse bekannt zu machen, wurden verschiedene Schritte unternommen:

1. Im Rahmen wissenschaftlicher Tagungen wurden die Forschungsergebnisse einem breiten Fachpublikum vorgestellt:
 - Holztechnologisches Kolloquium in Dresden (April 2024)
 - Freiburger Universitätsforum „Additive manufacturing of bio-based residue materials“ (Juni 2024)
 - Vortrag im Rahmen der Materialschau „Wege zur Bauwende“, Zentrum für Baukultur in Dresden (März 2025)
2. Auf Fachveranstaltungen wurde über die Technologie im persönlichen Gespräch berichtet und eine Reihe neuer Kontakte geknüpft:

- Formnext, Fachmesse zur additiven Fertigung, in Frankfurt/Main (November 2023)
 - Treffen des Netzwerkes „Sustainable Additive Manufacturing in Saxony“ (SAMSax) in Freiberg (November 2023)
3. Im Mai 2025 wurde das Projekt auf der Internationalen Messe der Zulieferer- und Möbelindustrie (Interzum) in Köln vorgestellt. Im Rahmen der Sonderschau „Trend Forum Materials & Nature“ wurde live mit dem holzbasierten Material gedruckt, die Technologie erklärt und mit potentiellen Anwendungspartnern in Kontakt getreten.

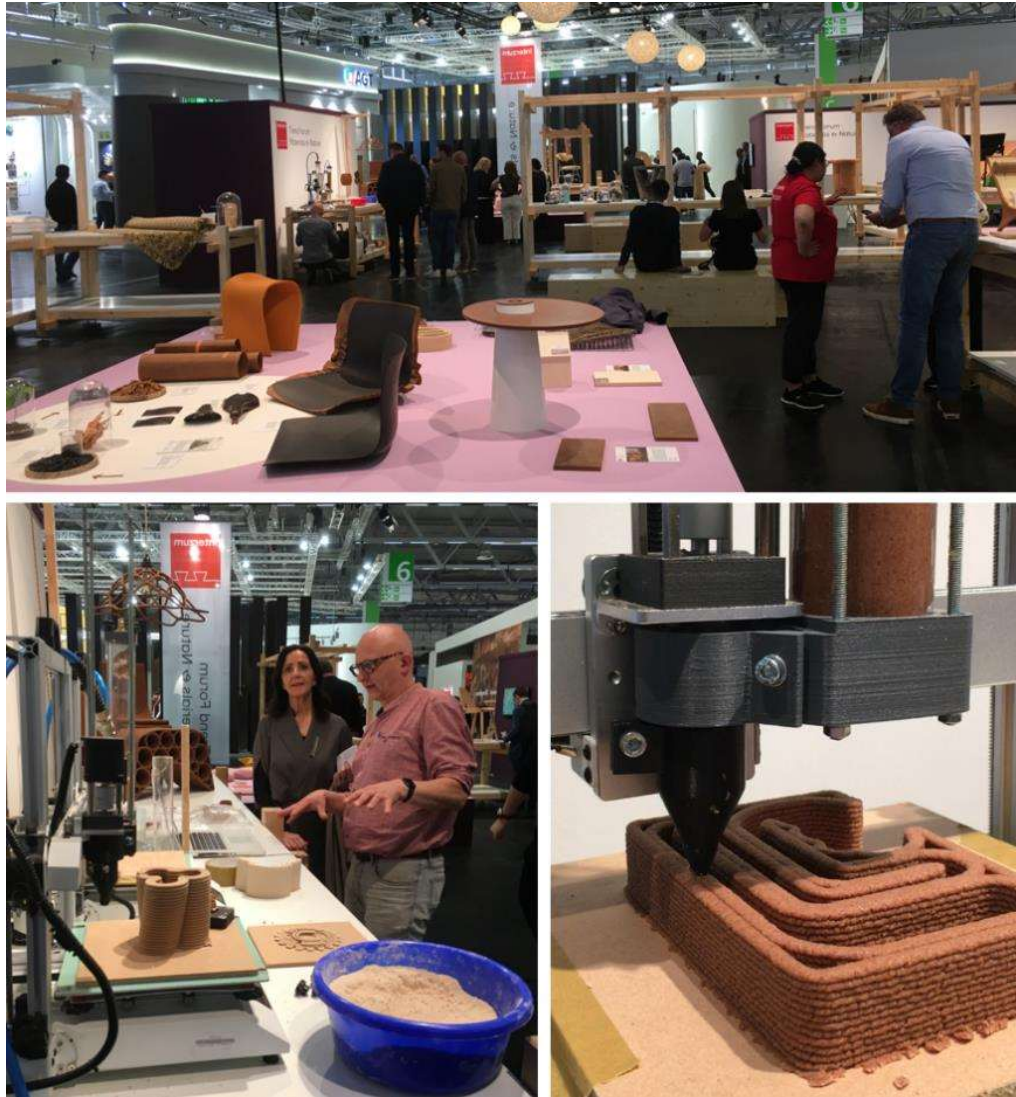


Abbildung 18: Präsentation des Projektes zu Interzum-Messe in Köln (2025)

Schluss: Fazit und Ausblick

Im Rahmen des Projektes konnte gezeigt werden, dass das Liquid Deposition Modeling (LDM) mit holzbasierten Werkstoffen ein hohes Potenzial für eine ressourceneffiziente, additive Fertigung langlebiger Produkte besitzt. Insbesondere der sehr hohe Holzanteil der entwickelten Materialien, der Einsatz von Reststoffen sowie der vergleichsweise geringe Energiebedarf des Verfahrens leisten einen relevanten Beitrag zur nachhaltigen Holznutzung und zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft. Durch eine Weiterentwicklung der Rezepturen gelang es, das Materialverhalten so weit zu verbessern, dass Objekte mit Höhen von mindestens 50 cm gefertigt werden können. Ergänzend konnte mit der Segmentbauweise ein praxistauglicher Ansatz zur Herstellung großformatiger Bauteile unabhängig vom Bauraum einzelner Drucker entwickelt werden. Die erfolgreiche Fertigung von Funktionsprototypen – insbesondere im Möbel- und Musikinstrumentenbau – verdeutlicht die

Anwendungsreife der Technologie und ihr Potenzial für industrielle wie handwerkliche Einsatzfelder, in denen individuelle Geometrien, Materialeffizienz und Nachhaltigkeit eine zentrale Rolle spielen. Zugleich machen die Ergebnisse deutlich, dass weiterhin Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Dies betrifft insbesondere die weitere Reduktion schwindungsbedingter Maßabweichungen sowie die Verbesserung der Feuchtebeständigkeit biobasierter Materialrezepturen. In künftigen Forschungsvorhaben sollten diese Fragestellungen systematisch vertieft und die gesamte Prozesskette – von der Materialaufbereitung bis zur Nachbearbeitung – weiter automatisiert werden. Dabei ist es von besonderer Bedeutung, konkrete anwendungsnahe Anforderungen von Unternehmen aufzugreifen, die eine Integration des Verfahrens in bestehende Produktionsabläufe anstreben.

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. Hui Zhong, Mingzhong Zhang (2022): 3D printing geopolymers: A review. *Cement and Concrete Composites*, Volume 128
4. Krapež Tomec, D. and Kariž, M. (2022): Use of wood in additive manufacturing. Review and future prospects. *Polymers* 14(6): 1174
5. Nguyen-Van, V., H. Panda, B., Nguyen-Xuan, H., Tran, P. (2022): 3D concrete printing modelling of thin-walled structures. *Structures* 39: 496-511. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.049>.
6. 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
7. Rosenthal, M.; Rüggeberg, M.; Gerber, C.; Beyrich, L.; Faludi, J. (2023a): Physical properties of wood-based materials for liquid deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal* 29(5): 1004-1013.
8. Rosenthal, M.; Gerber, C.; Bodenschatz, U. (2023b): Liquid Deposition Modeling mit holzbasierten Werkstoffen. *Material- und Technologieentwicklung*. Vortrag zum 4. Kooperationsforum „Holz als neuer Werkstoff“ der Cluster-Initiative Forst und Holz in Bayern gGmbH am 28.02. und 01.03.2023
9. Sauerwein, M., Zlopasa, J., Doubrovski, Z., Bakker, C., & Balkenende, R. (2020): Reprintable Paste-Based Materials for Additive Manufacturing in a Circular Economy. *Sustainability*, 12(19): 8032
10. Statista (2022): Anzahl der in Deutschland produzierten Möbel nach Produktgruppen im Jahr 2021. Online: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/239307/umfrage/stueckzahl-in-der-moebelproduktion-in-deutschland-nach-produktgruppen/> (14.6.2022)
11. Wenker, J. L., Rüter, S. (2015): Ökobilanz-Daten für holzbasierte Möbel. *Thünen-Report* 31, Braunschweig
12. Zhang, C., Nerella, V.N., Krishna, A., Wang, S., Zhang, Y., Mechtcherine, V., Banthia, N. (2021): Mix design concepts for 3D printable concrete. A review. *Cement and Concrete Composites* 122: 104155
13. Zhong, H., Zhang, M. (2022): 3D printing geopolymers. A review. *Cement and Concrete Composites* 128: 104455