Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

DATIpilot

DATIpilot Modul 1 Innovationssprints

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Kurzbericht und Eingehende Darstellung öffentlich

Additiv gefertigte Kulissen – das moderne Theater

TheAMter

	Institution	Name Projektleitung	Förderkennzeichen
3D-Druck (Koordination)	TU Bergakademie Freiberg (TUBAF)	Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler	03DPS1049A
Kulissenbau	Städtische Theater Chemnitz gGmbH (STC)	Norbert Richter	03DPS1049B

LAUFZEIT: 01.09.2024 – 28.02.2026

Freiberg, den 31.08.2026

Autorenschaft: Leif Bretschneider, Henning Zeidler, Daniel Horvath, Norbert Richter

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

Inhalt

1 Kurzbericht 2
1.1 Ausgangslage des Vorhabens 2
1.1.1. Ursprüngliche Aufgabenstellung 2
1.1.2. Ursprüngliche wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele 2
1.1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 3
1.2 Ablauf des Vorhabens 4
1.3 Ergebnisse des Vorhabens 4
1.3.1. Wesentliche Ergebnisse 4
1.3.2. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 5
2 Eingehende Darstellung 6
2.1 Durchgeführter Arbeitsplan 6
2.2 Erreichte Meilensteine 22
2.3 Erreichte Ergebnisse 23
2.3.1 Erreichung der Gesamtziele 23
2.3.2 Erreichung der wissenschaftlichen und/oder technischen Arbeitsziele 23
2.4 Verwertung 24
2.4.1 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses 24
2.4.2 Fortschritt Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens 25
2.4.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse 25
2.4.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit 25

1 Kurzbericht

1.1 Ausgangslage des Vorhabens

1.1.1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Gesamtziel des Innovationssprints	Das Ziel des Gesamtvorhabens ist es, Theaterrequisiten als Prototyp mittels optimierter und angepasster additiver Fertigung herzustellen und auf der Bühne zu erproben.
Beitrag des Teilprojekts A	Das Ziel des Teilprojektes A ist die erfolgreiche Material- und Maschinenanpassung sowie additive Fertigung von Requisiten aus Holzreststoffen mittels Pastenextrusion. Außerdem erfolgt die Entwicklung eines Konzeptes zur Implementierung des Fertigungsverfahrens und seiner Prozesskette in der Theaterwerkstatt.
Beitrag des Teilprojekts B	Ziel des Teilprojektes B ist die erfolgreiche End- bzw. Nachbearbeitung von 3D-gedruckten Requisiten sowie deren Einsatz auf der Bühne. Darüber hinaus soll der Einsatz von Flammschutzmitteln zur Erreichung der Brandschutzbestimmungen geprüft und etabliert werden.

1.1.2. Ursprüngliche wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele

Geplante konkrete Arbeitsziele: Gesamtprojekt
• Es sind umfangreiche Materialanpassung (mind. jeweils 2 Variationen der Partikelgrößenverteilung, des Binder- und Feuchtigkeitsgehaltes) und Maschinenanpassung (Druckbett, Düse, Kühlung des Extruders, Materialbehälter, etc.) auf Materialextrusion mit pastösem Material aus Holzreststoff und Alginat abgeschlossen
• Die gesamte Prozesskette wird hinsichtlich der Anforderungen an Theaterkulissen optimiert (auch Materialvorbereitung und -nachbereitung).
• Konzeptentwicklung für Implementierung der Fertigung im Theater ist abgeschlossen.
Geplante konkrete Arbeitsziele: Teilprojekt A
• Erzeugung von mind. 100 l für die Verarbeitung nutzbares Holzpulver aus Reststoff von Theater Chemnitz.
• Ermittlung mind. eines geeigneten Trocknungsprozesses für die Anwendung im Theater
• 100 % Wiederverwendbarkeit anhand von mind. 5-maligen Kreislaufversuchen nachgewiesen
• Fertigung und Trocknung von 2 Prototyen (klein: Durchmesser < 0,4 m und groß: Durchmesser > 0,4 m)
Geplante konkrete Arbeitsziele: Teilprojekt B
• Erarbeitung von zwei Prototypen als geeignete Kulisse
• Ermittlung von mind. 5 geeigneten Nachbearbeitungsmethoden für additiv gefertigte Bauteile.
• Anwendung des kleinen Prototypen (Durchmesser < 0,4 m) in mind. 2 Spielzeiten
• Gefertigte Probekörper entsprechen den Brandschutzstandard

1.1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Stand der Wissenschaft und Technik

Materialextrusion mit pastösen Materialien ist gerade für die Verwendung von Reststoffen geeignet, da keine Wärmeenergie in das Material gebracht wird und somit grundsätzlich jedes beliebige Material verdruckt werden kann, welches zu einer knetfähigen Masse überführt werden kann.

Die Materialextrusion mit Holzpulvern wurde vor allem durch *Rosenthal* [Rapid Prototyping Journal 2022, vol. 29 no. 5, https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2022-0322] vorangetrieben. Er setzt neben Nadelholz (d < 125 µm) als Binder jedoch Cellulose ein, welche andere Verarbeitungseigenschaften hat. Alginat hat gegenüber Cellulose den Vorteil, dass die feuchten Massen im Kühlschrank als auch Gefrierfach gelagert werden können. *Rosenthal* beschäftigt sich vorwiegend mit dem Möbelbau und somit großen tragenden Strukturen. Theaterkulissen hingegen können von sehr kleinen bis 3 m hohen Körpern reichen und müssen durch den Einsatz auf der Bühne besonderen Brandschutzanforderungen entsprechen.

Weiterhin hat *Sauerwein* schon Kiefern- und Ahornholz erfolgreich mit Alginat verdruckt. Jedoch lag hier der Anteil an Holz im Produkt bei 15 bzw. 18 Gew.-%. Das eingesetzte Holzpulver war feiner als 75 µm. [Sustainability, 2020, ICS 12(19), 8032. DOI: 10.3390/su12198032]

Neben *Rosenthal* gibt es noch zwei weitere Veröffentlichungen welche einen Anteil an Holz im Verbundwerkstoff von über 50 % besitzen: *Kam* mit Holzpulver (d < 80 µm) und Cellulose als Binder [Advanced Materials Technologies, 2019, ICS 4(9), 1900158. DOI: 10.1002/admt.201900158] und *Kaufhold* mit Holzmischung aus Pulver (d<500 µm) und Spänen (d<2mm) [Rapid Prototyping Journal, 2019, ICS 25(4), 690-698. DOI: 10.1108/RPJ-04-2018-0109]. *Kaufhold* hat Stärke als Binder und eine sehr große Düse (50x10 mm) eingesetzt. Bis auf *Kaufhold* haben bisher alle Autoren sehr feine Holzpulver eingesetzt, für welche der Energieaufwand in der Aufbereitung hoch ist. Insgesamt ist die Schwindung in z-Richtung aufgrund von Eigengewicht am größten und liegt bei 15-20 %. Diese kann mit der Verwendung von gröberen Partikeln begrenzt werden. Die eigenen Vorversuche lieferten Werte für die Schwindung in z-Richtung von ca. 10 %.

Bisherige Arbeiten der Antragsteller

Die Professur für Additive Fertigung (TUBAF) besitzt umfangreiche Erfahrungen mit der additiven Fertigung (AF) von nachwachsenden Rohstoffen und Reststoffen [Acamonta 29 (2022), pp. 155-157. ISSN 2193-309X], [Proceedings of the 2nd International Conference on Circular Packaging, Ljubljana, Slovenia, 2021, S. 269-275, ISBN 978-961-90424-6-5]. Speziell konnten in der Pastenextrusion in Vorversuchen erste Anschauungsobjekte aus Holzreststoff und 15 Gew.-% Alginat als Bindemittel erfolgreich gedruckt werden [Sustainability 2024, 16, 823. https://doi.org/10.3390/su16020823]. Zudem wurde die Rezyklierbarkeit anhand von kleinen Probekörpern bestätigt. Die gefertigten Probekörper haben eine geringe Dichte bei einer sehr ansprechenden Festigkeit. Das Verfahren selbst ist gut skalierbar und bietet die Möglichkeit, später auch sehr große Kulissen zu fertigen. Der Reststoff Holzmehl ist in der Theaterwerkstatt in ausreichenden Mengen verfügbar und kann zudem lokal von anderen Lieferanten kostenfrei beschafft werden.

Theater Chemnitz (STC) digitalisiert die Bühnenbildentwürfe für die laufende Fertigung und hat grundlegende Erfahrung mit 3D-Scanning und Materialextrusion mit Kunststoffen (Filamentdruck). Zudem besteht großes Interesse, weitere AF-Technologien in der „kunsthandwerklichen“ Fertigung einzusetzen. Bisheriger Standard in Theaterwerkstätten ist die konventionelle Arbeit mit Freihandmodellierungen (Theaterplastik) und spanende Bearbeitung von expandiertem Polystyrol. Dies ist wenig nachhaltig und produziert viel (Sonder-)Müll. Ziel ist hier eine nachhaltigere, recyclingfähige und schnellere Fertigung zu ermöglichen.

Ein erstes gemeinsames Projekt konnte im Jahr 2022 erfolgreich umgesetzt werden: Kapitelle für die AIDA-Aufführung wurden additiv im Binder Jetting Verfahren gefertigt und eingesetzt (https://samsax.de/gedruckte-kunst-kunstdruck). Dies ist mit der Unterstützung des Projektes simul+ Reallabor SAMSax erfolgt.

Im Reallabor SAMSax ist es möglich Voruntersuchungen für den Innovationstransfer durchzuführen. Umfangreiche Material- und Maschinenanpassungen sind in diesem Projekt personell nicht umsetzbar. Leider ist das für die Kapitelle verwendete AM-Verfahren (Binder Jetting) aufgrund von Kosten und Anforderungen

nicht für die direkte eigene Umsetzung in Theaterwerkstätten geeignet. Als Alternative wurde die Materialextrusion mit pastösen Materialien ausgewählt. Dieses Verfahren ähnelt in den einsetzbaren Materialien und der Bearbeitbarkeit den konventionellen Methoden der Theaterplastik. Hier kann das Theater mit seinem vorhandenen Wissen zu Theaterplastik ansetzen und an den 3D-gefertigten Objekten weiterarbeiten.

1.2 Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen des Projekts TheAMter wurde über 18 Monate Laufzeit der 3D-Druck von Theaterkulissen aus Holzreststoffen weiterentwickelt und in vier prototypischen Skulpturen erprobt. Der Fokus lag dabei auf der Nutzung von Holzpulvern (Stäube und Späne), wie sie durch die Holzverarbeitung in den Werkstätten des STC regelmäßig anfallen, um lokale Materialkreisläufe zu entwickeln. Zu Projektbeginn startete die TUBAF mit der Materialaufbereitung, indem die Holzreststoffe des STC analysiert und mittels einer kontinuierlichen Siebanlage fraktioniert wurden. Ein Teil der aufbereiteten Reststoffe sowie Bindemittel (zunächst Alginat) wurden dem STC für Vorversuche zur Verfügung gestellt. Das STC führte daraufhin zahlreiche Versuche zur Verarbeitung, Trocknung und Nachbearbeitung von Holz-Alginat-Pasten durch. Die TUBAF nutzte die aufbereiteten Reststoffe für umfangreiche Materialunteruntersuchungen zur Optimierung von Binderauswahl und -anteil, Feuchtigkeitsgehalt und Partikelgrößen hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Schrumpfungsverhalten und Festigkeiten getrockneter Strukturen.

Nachdem zunächst der Fensterrahmen für ein gothisches Fenster gedruckt werden sollte, erste Versuche jedoch zeigten, dass die Geometrie ungeeignet ist, wurden vier Skulpturen („Gargoyles“) für das Bühnenbild des Stücks „Das Bildnis des Dorian Gray“ als Prototypen ausgewählt. Die länglichen, liegend zu druckenden Rahmensegmente verformten sich in Folge der Trocknung zu stark und durch einen hohen erforderlichen Materialfüllgrad (100 % Infill) war die Trocknung sehr zeitintensiv und führte zu Rissbildung. Die „Gargoyles“ hingegen, konnten in mehrere Segmente geteilt werden, die als offene Strukturen mit 40 % Materialfüllgrad gedruckt werden konnten. Trotzdem bedurften Fertigung und Trocknung der Prototypen mehrere Iterationen bis die passende Materialrezeptur sowie das Trocknungsregime gefunden waren. Im Mai 2025 konnten zwei Skulpturen (in Segmenten) als erster Prototyp an das STC zur Nachbearbeitung übergeben werden. Anschließend wurden die fertiggestellten Skulpturen auf der Bühne eingesetzt.

Nach Fertigstellung des ersten Prototyps widmeten sich die Partner weiter der Materialoptimierung. Weitere Trocknungsregime wurden erprobt, Recyclierversuche durchgeführt, Flammschutzmittel und weitere Nachbearbeitungsmethoden getestet. Parallel erfolgte die Planung zur Implementierung der Prozesskette am STC. Letztlich wurde im Herbst 2025 ein 3D-Drucker zur Pastenextrusion am STC in Betrieb genommen, welcher im Rahmen eines Anwenderworkshops am 04.12.2025 für eine Live-Demonstration vor anderen Theaterschaffenden verwendet wurde. Als zweiter Prototyp wurden die zwei fehlenden „Gargoyles“ mit optimiertem Material und Prozess gefertigt und Anfang Januar 2026 an das STC zur Nacharbeit übergeben. Im internen Projektabschlusstreffen am 26.02.2026 wurden die Ergebnisse des Projekts diskutiert, die optimierte Strategie zum Druck von Theaterkulissen dokumentiert und nächste Entwicklungsschritte geplant.

1.3 Ergebnisse des Vorhabens

1.3.1. Wesentliche Ergebnisse

Das TheAMter-Projekt konnte zeigen, dass aus Holzreststoffen – wie Säge- und Frässpänen – druckbare Pasten hergestellt und zu komplexen, bühnenreifen Theaterrequisiten wie „Gargoyles“ additiv gefertigt werden können. Die zentrale wissenschaftlich-technische Herausforderung, ein Material zu entwickeln, das sowohl ausreichend fest ist als auch bei der Trocknung wenig schrumpft, wurde nicht mit einem „optimalen“ Material gelöst, sondern durch eine zielgerichtete Materialwahl je nach Anforderung: Es gibt kein einheitlich „bestes“ Material, sondern die Wahl hängt von den Prioritäten ab. So liefert Alginat die höchste Biegefestigkeit – ideal für Bauteile, die hohe mechanische Belastung aushalten müssen. Dagegen bieten zellulosebasierte Binder wie Zell-Leim und Benecel® eine deutlich geringere Schrumpfung, sind aber weniger stabil. Sie sind daher die bessere Wahl, wenn Formgenauigkeit und geringe Verzugstendenz entscheidend sind – etwa bei detailreichen, dünnen Strukturen.

Ein weiterer Fortschritt war die Entwicklung einer Materialrezeptur, welche die Schimmelbildung währedn der langen Trocknungsphase verhindert: Indem 2,5 % der erforderlichen Wassermenge durch Essigessenz (25 %ige Lösung) ersetzt werden, wird die Schimmelbildung verhindert – eine einfache, kostengünstige und wirksame Maßnahme, die sich in der Praxis bewährt hat. Die optimierten Druckparameter (4-mm-Düse, Schichthöhe 2 mm, Infill-Gitter 40 %) ermöglichten die Fertigung anspruchsvoller Geometrien mit Überhängen und feinen Details.

Die Recyclingfähigkeit des Materials wurde für Alginatbasierte Pasten nachgewiesen: Durch das Auflösen gedruckter Strukturen in Wasser sind weitere Verarbeitungszyklen möglich – auch wenn die mechanischen Eigenschaften nach zwei Zyklen um ca. 30 % abnehmen. Dies zeigt, dass das Material nicht 100 % recycelbar ist, aber dennoch einen wichtigen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft leistet. Hinsichtlich der Trocknung hat sich ein sicheres, langsameres Regime bewährt: 24 Stunden Lufttrocknung mit Ventilator, gefolgt von 5–7 Tagen im Klimaschrank bei 50 °C und 10 % Luftfeuchtigkeit.

Zu den Nebenergebnissen zählt die Entwicklung eines vollständigen, selbstständigen Fertigungskonzepts für das Städtische Theater Chemnitz: Von der Siebung der Holzreststoffe über die Pastenherstellung, den 3D-Druck mit dem Stone Flower V bis zur Nachbearbeitung und Trocknung kann nun alles vor Ort erfolgen. Auch wenn die Erprobung von Flammschutzmitteln (COLORIMP®, BIORETARD®) zeigte, dass diese die Verarbeitbarkeit beeinträchtigen können, wurde auf eine nachträgliche Beschichtung zurückgegriffen – eine praktikable Alternative.

Die ursprüngliche Aufgabenstellung – die Entwicklung einer nachhaltigen, selbstständigen additiven Fertigung von Theaterkulissen aus Holzreststoffen – wurde vollständig erreicht. Nicht nur wurden Prototypen gefertigt, sondern ein praxistaugliches, wirtschaftliches und nachhaltiges Konzept für die Theaterpraxis entwickelt. Auch wenn einige Ansätze (z. B. einzelne Bindemittel, Mikrowellentrocknung) nicht funktionierten, wurden diese Erkenntnisse wertvoll für die Weiterentwicklung. Das Projekt hat gezeigt: Additive Fertigung ist nicht nur für Industrie und Medizin, sondern auch für die Kultur eine nachhaltige und kreative Zukunftstechnologie.

1.3.2. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Laut Vorhabensbeschreibung war im Projekt keine spezifische Zusammenarbeit mit Dritten geplant. Trotz dessen ist zu erwähnen, dass die TUBAF im Rahmen ihrer wissenschaftlichen Tätigkeit im kontinuierlichen Austausch zu anderen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern steht, die im selben Bereich forschen. Durch das simul+ Reallabor SAMSax, welches bis Ende 2025 an der TUBAF vom Freistaat Sachsen gefördert wurde, besteht ein enger Kontakt zur Professur für Holztechnologie und holzbasierte Bioökonomie der TU Dresden, sodass Forschungsergebnisse in regelmäßigen Abständen ausgetauscht und diskutiert werden. Ebenfalls befindet sich der Projektmitarbeitende der TUBAF in regelmäßigem Austausch mit Dr.-Ing. Michael Rosenthal von der Professur für Forstnutzung (ebenfalls TU Dresden), der seit vielen Jahren zum 3D-Druck mit holzbasierten Pasten forscht.

Der Austausch mit anderen Forschungsinstitutionen hat bei der Auswahl der Bindemittel, welche im Rahmen des Projekts verglichen wurden, geholfen.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Durchgeführter Arbeitsplan

Arbeitspaket	Partner	abgeschlossen	nicht abgeschlossen	nicht durchgeführt
1.1 Reststoffaufbereitung	TUBAF	☒	☐	☐
1.2 Materialanpassung	TUBAF	☒	☐	☐
1.3 Maschinenanpassung	TUBAF	☒	☐	☐
1.4 Nachbearbeitungsmethoden	STC	☒	☐	☐
2.1 Auswahl geeigneter Requisiten	STC	☒	☐	☐
2.2 Fertigung der Prototypen	TUBAF	☒	☐	☐
2.3 Nachbearbeitung und Fertigstellung der Prototypen	STC	☒	☐	☐
2.4 Langzeiteinsatz auf Bühne	STC	☒	☐	☐
3.1 Optimierung der Trocknung	TUBAF	☒	☐	☐
3.2 Recyclierversuche mit Probekörpern	TUBAF	☒	☐	☐
3.3 Erprobung von Flammschutzmitteln	STC	☒	☐	☐
3.4 Optimierung von Nachbearbeitungsmethoden	STC	☒	☐	☐
4.1 Bestandsaufnahmen am Theater	STC	☒	☐	☐
4.2 Konzeptentwicklung anhand der Prozessschritte	TUBAF	☒	☐	☐
5 Management, Schutzrechte, Außendarstellung	TUBAF	☒	☐	☐

Arbeitspaket 1.1 Reststoffaufbereitung

Über 600 Liter der durch die STC bereitgestellten Holzreststoffe wurden an der TUBAF mittels einer kontinuierlichen Siebanlage in die drei Fraktionen (d < 250 µm, 250 µm < d < 500 µm, d > 500 µm) separiert. Die Fraktion 0/355 µm wurde nicht näher betrachtet, da aufgrund der Materialmenge nur eine kontinuierliche Siebanlage in Frage kam und für diesen Siebschnitt kein entsprechendes Sieb zur Verfügung stand.

Abbildung 1: Holzreststoff-Pulver (v.r.n.l. Anlieferzustand, d > 500 µm, 250 µm < d < 500 µm, d < 250 µm)

Die gröbste Fraktion der staubfreien Holzspäne (d > 500 µm) wurde als Tiereinstreu abgegeben. Da das Ausgangsmaterial der Theaterwerkstatt, bestehend aus Schleifstäuben sowie Säge- und Frässpänen, fertigungsbedingten Schwankungen in der Zusammensetzung unterliegt, variiert auch die Partikelgrößenverteilung in den beiden genutzten Fraktionen von Charge zu Charge. Um dies zu erfassen, wurde die Partikelgrößenverteilung von 10 Chargen bestimmt (CamSizerXT, Retsch GmbH, siehe Abbildung 2).

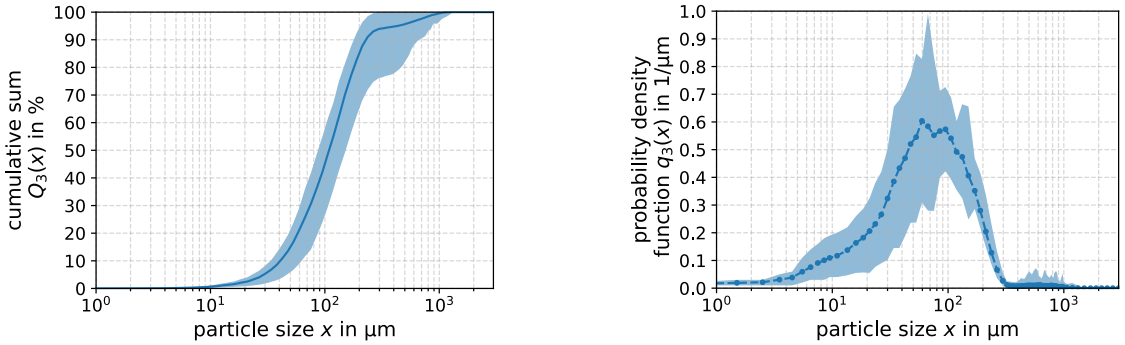


Abbildung 2: Streuung der Partikelgrößenverteilung zwischen den verschiedenen Materialchargen

Arbeitspaket 1.2 Materialanpassung

Im Rahmen der Materialanpassung wurden zwei Partikelfraktionen, fünf Bindemittel, je drei Binderanteile sowie unterschiedliche Feuchtigkeitsstufen betrachtet. Neben der Haptik und Optik gedruckter Strukturen, die für die Nachbearbeitung durch das STC relevant sind, wurden die Verarbeitbarkeit im MEX-CRB-Verfahren, das Schrumpfungsverhalten und die mechanischen Endeigenschaften (Biegefestigkeit und -dehnung) verglichen. Folgende Binder wurden untersucht: Alginat, Culminal®, Zell-Leim, Benecel® und Methocel® (siehe Tabelle 1). Alle Binder sind biobasiert, wasserlöslich und physiologisch unbedenklich.

Tabelle 1: Betrachtete Bindemittel im TheAMter-Projekt

Binder-/Markenname	Inhaltsstoff	Klopfdichte (experimentell)	Preis
(Natrium-)Alginat	Natriumsalz der Alginsäure	0,75 g/cm³	45,90 €/kg
Culminal®	Hydroxypropylmethylcellulose	0,34 g/cm³	104,70 €/kg
Zell-Leim	Natrium-Carboxymethylcellulose	0,83 g/cm³	6,17 €/kg
Benecel®	Methylcellulose	0,38 g/cm³	103,65 €/kg
Methocel®	Methylcellulose	0,31 g/cm³	95,56 €/kg

Die Klopfdichten zeigen, dass die Binder in ungelöster Pulverform große Unterschiede aufweisen. Bei Festlegung von Binderanteilen in Gewichtsprozent hätte dies die Folge, dass unterschiedliche Volumina zur Verfügung stehen, um die Holzpartikel zusammenzuhalten. Um Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde ein volumenbasierter Ansatz auf Basis der Klopfdichten verfolgt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Binderanteile bei konstanten Volumenverhältnissen

Binder	Level -1 (4,9 Vol.%)	Level 0 (6,5 Vol.%)	Level 1 (8,1 Vol.%)
(Natrium-)Alginat	14,8 Gew.%	19,1 Gew.%	23,1 Gew.%
Culminal®	7,5 Gew.%	10,0 Gew.%	12,5 Gew.%
Zell-Leim	16,1 Gew.%	20,7 Gew.%	24,9 Gew.%
Benecel®	6,8 Gew.%	9,0 Gew.%	11,1 Gew.%
Methocel®	8,1 Gew.%	10,7 Gew.%	13,2 Gew.%

Zur Beurteilung und zum Vergleich der Extrudierbarkeit der Pasten, wurde auf Basis der Arbeit von Kuchem[1] eine Methode zur Bestimmung der Extrusionsenergie entwickelt und angewandt. Hierzu wird die zu untersuchende Paste in eine 50 ml-Spritze mit 8 mm Auslassdurchmesser gefüllt. Im Anschluss wird die

[1] https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/7906

Spritze mit Hilfe eines Adapters in einer Universalprüfmaschine positioniert, sodass analog zur klassischen Druckprüfung die Traverse der Prüfmaschine den Spritzenstempel nach unten bewegt, wodurch die Paste aus der Spritze gedrückt wird. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Kraftverlauf zur Extrusion von 50 ml wird gemessen und unter Berücksichtigung des Verfahrwegs in eine Energie umgerechnet. Da Reibungsbedingt auch für das Ausdrücken einer ungefüllten Spritze Energie erforderlich ist, wird diese Referenzenergie in Vorversuchen bestimmt und stets von den gemessenen Energien für die verschiedenen Pasten abgezogen. Je Paste und Binderlevel wurden drei Versuche durchgeführt.

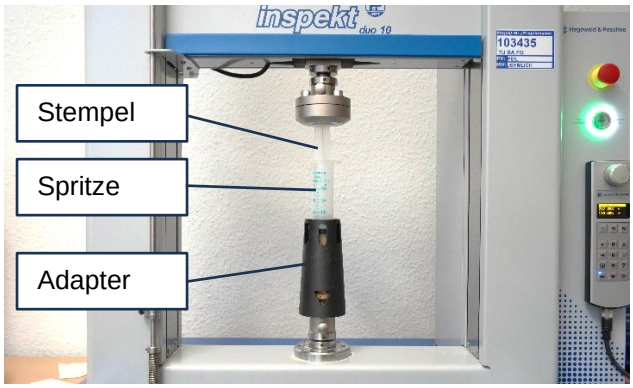


Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Extrusionsenergie

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Extrusionsenergiebestimmung inklusive linearer Regressionen dargestellt (siehe Abbildung 4). Es zeigt sich, dass für alle Binder dessen Anteil an der Pastenrezeptur einen wesentlichen Einfluss auf die erforderliche Extrusionsenergie und damit die Viskosität hat. Dabei ist der Effekt negativ, sodass mit zunehmendem Binderanteil geringere Extrusionsenergien aufzuwenden sind. Entsprechend nimmt die Viskosität mit steigendem Binderanteil ab, sodass die Pasten leichter verarbeitet werden können. Zusätzlich zeigen sich deutliche Unterschiede in der Pastenviskosität je nach Binder. Während Methocel® die größten Extrusionsenergien aufweist, benötigt Zell-Leim – bei gleichem Volumenanteil – nur ca. die Hälfte der Energie zur Extrusion. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass eine Erhöhung des Binderanteils die Verarbeitung vereinfachen und bei Extrusionsproblemen Abhilfe verschaffen kann.

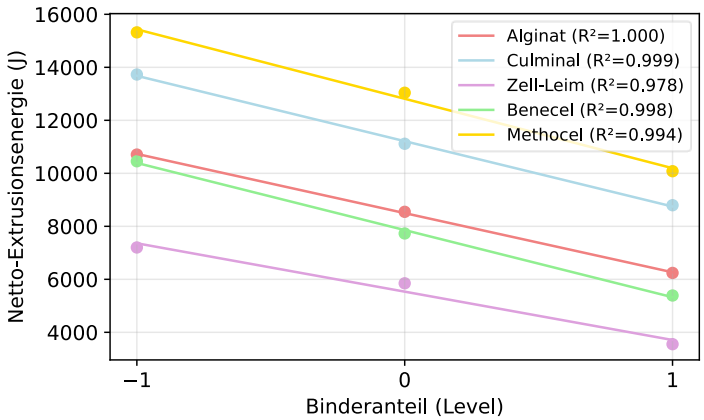


Abbildung 4: Extrusionsenergien der fünf Binder in Abhängigkeit vom Binderanteil

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften wurden für jede Materialrezeptur (Binder, Binderanteil) zehn Biegebalken mit den Abmaßen 24x90x25 mm³ unter Verwendung einer 6 mm-Düse gedruckt (Schichthöhe: 2,5 mm, Druckgeschwindigkeit: 20 mm/s). Der Druck erfolgte mit einem selbst entwickelten Desktop-MEX-CRB-Drucker[2] unter Verwendung der 50 ml-Spritzen. Nach 24 h Lagerungen bei Raumklima, wurden die Probekörper im Klimaschrank (ICH-110, Memmert GmbH + Co. KG) bei 55 °C und

[2] Denker et al.: Material extrusion printer for pastes based on a commercial desktop filament printer for plastics, https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:520-qucosa2-944665

10 % RH getrocknet, bis Massestabilität und damit vollständige Trocknung erreicht waren (siehe Abbildung 5, links). Die Balkenprüfkörper wurden an einer Bandschleifmaschine (BTS800 Scheppach, 120er Körnung) nachbearbeitet, um ebene und rechtwinklige Oberflächen und eine Form von ca. 20x80x20 mm³ gemäß DIN EN ISO 178 zu gewährleisten (siehe Abbildung 5, mitte). An einzelnen Balken wurden während des Schleifprozesses Poren und Fehlstellen festgestellt, sodass diese aussortiert werden mussten. Für die Biegeprüfung standen somit jeweils zwischen sechs und zehn Prüfkörper zur Verfügung.

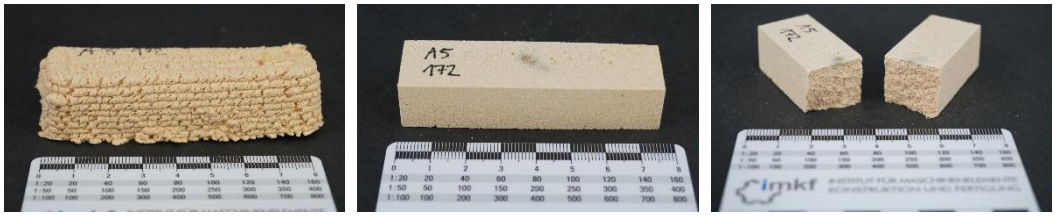


Abbildung 5: Biegeprüfkörper (v.r.n.l.: nach Trocknung, nach Schleifen, nach Prüfung)

Die Ergebnisse sind nachfolgend in Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt.

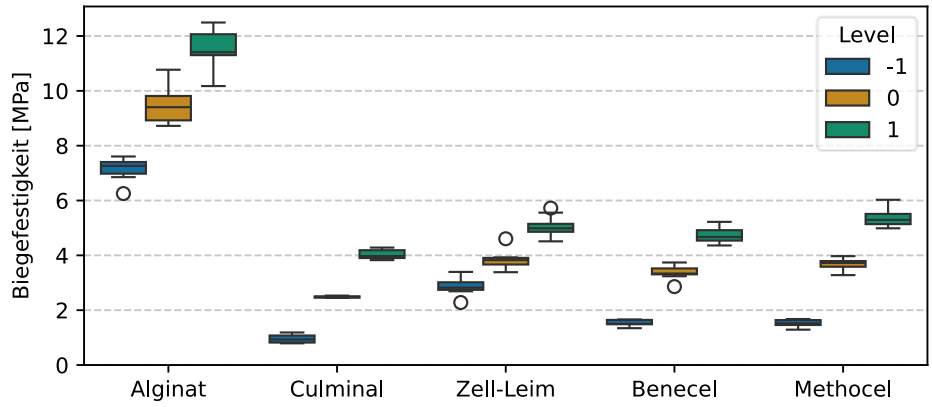


Abbildung 6: Vergleich der Biegefestigkeiten je nach Binder und -anteil

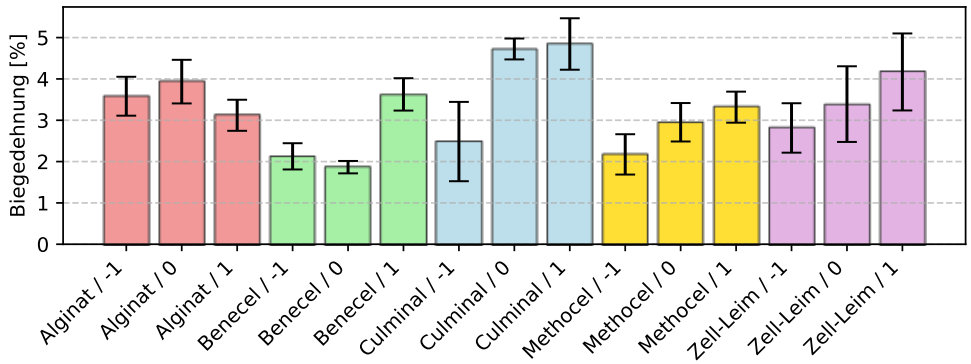


Abbildung 7: Vergleich der Biegedehnungen je nach Binder und -anteil

Es zeigt sich, dass Alginat im Vergleich zu den vier anderen Bindern deutlich höhere Biegefestigkeiten aufweist. Selbst die niedrigste Stufe des Binderanteils erreicht mit 7,13 MPa eine höhere Biegefestigkeit als die größte Stufe bei den anderen Bindern. Die Mittelwerte der Biegefestigkeiten der anderen Binder liegen alle in einem Bereich von 4 bis 5 MPa für die höchste Stufe des Binderanteils (8,1 vol.%). Alle Binder zeigen einen deutlichen positiven Effekt des Binderanteils auf die Biegefestigkeit, sodass ein höherer Binderanteil zu stabileren Bauteilen führt.

Bei der Biegedehnung zeigen sich weniger Trends. Für Culminal®, Methocel® und Zell-Leim lässt sich eine Zunahme der Biegedehnung mit Erhöhung des Binderanteils identifizieren. Alginat und Benecel® zeigen diese Trends nicht. Generell lassen sich keine relevanten Unterschiede bei den Biegedehnungen ausmachen und für die höchste Binderstufe liegen die Mittelwerte zwischen 3 und 5 %.

Das vertikale Schrumpfungsverhalten wurde ermittelt, indem auf demselben Drucker mit einer 8 mm-Düse Hohlzylinder (Außendurchmesser: 48 mm, Höhe: 65 mm) im Spiralvasenmodus gedruckt wurden (Schichthöhe: 3,5 mm, Druckgeschwindigkeit: 10 mm/s). Anschließend wurde deren Höhe sowohl im feuchten, als auch im vollständig getrockneten Zustand bestimmt. Die Schrumpfung ergibt sich aus der Höhendifferenz im Verhältnis zur Ursprungshöhe.

Prüfkörper vert. Schrumpfung

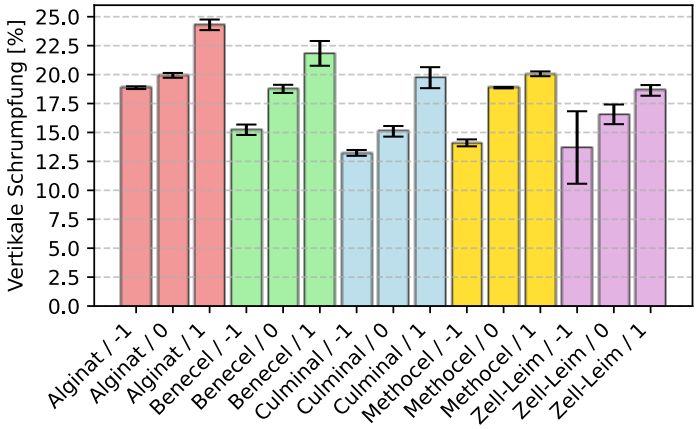


Abbildung 8: Vergleich der vertikalen Schrumpfung zwischen den Bindern

Bei der vertikalen Schrumpfung, die sich aus dem Schrumpfungsverhalten während der Trocknung sowie dem Zusammensinken der feuchten Geometrie bedingt durch das Eigengewicht ergibt, zeigt sich, verglichen mit der Biegefestigkeit, ein umgekehrtes Bild. Die Nutzung von Alginat als Bindemittel führt im Vergleich zu den anderen Bindern zur größten vertikalen Schrumpfung und das in allen drei Stufen des Binderanteils. Die geringsten Schrumpfungswerte konnten für Culminal und Zell-Leim gemessen werden (13,23 % und 13,71 % bei niedrigstem Binderanteil). Über alle Bindemittel hinweg zeigt sich, dass ein größerer Binderanteil zu einer stärkeren vertikalen Schrumpfung führt.

Dies verdeutlicht, dass die Wahl des Bindemittels sowie dessen Anteil stets ein Kompromiss zwischen der notwendigen Festigkeit und der zulässigen vertikalen Schrumpfung ist.

Nach den beschriebenen Versuchsreihen zur Materialanpassung bzw. -optimierung wurde in einer weiteren Untersuchung eine Demonstratorgeometrie von den Prototypen abgeleitet. Hierzu wurde ein repräsentatives Skulpturenelement (Greif Segment 1) ausgewählt und so skaliert, dass der Druck in verkürzter Zeit erfolgen kann (X und Y: 75 %, Z: 100 %). Diese Skalierung ermöglicht, dass das mittlere Tankvolumen des WASP 40100 Clay ausreicht, um die Demogeometrie zwei Mal zu drucken. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass individuelle Artefakte bei der Trocknung erkannt werden. Die Demonstratorgeometrie wurde mit allen Bindern sowie mit Bindermischungen, die sich als vielversprechend herausstellten, gedruckt und nach dem finalen Trockenregime (siehe AP 3.1) getrocknet (siehe Abbildung 9).

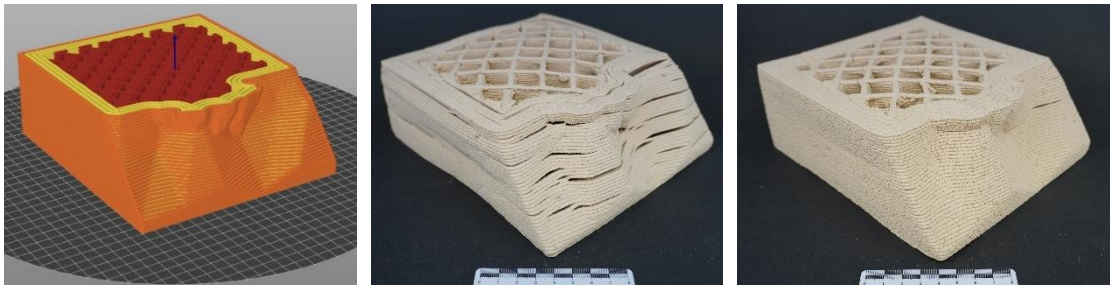


Abbildung 9: Demonstratorgeometrie gesliced (links) und gedruckt (mitte: Alginat, rechts: Zell-Leim)

Lediglich bei Culminal® wurden die Demonstratorgeometrie nur mit Bindermischungen (mit Alginat) gedruckt, da reine Culminal®-Pasten aufgrund hoher Zähigkeit in großem Volumen schwer zu verarbeiten waren. Die untersuchten Materialmischungen sind nachfolgend in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Materialmischungen zum Druck der Demonstratorgeometrie

Für Demonstratorgeometrie genutzte Materialmischungen	
• 15 Gew.% Alginat	• 20 Gew.% Zell-Leim
• 13,5 Gew.% Alginat / 1,5 Gew.% Culminal	• 10,7 Gew.% Benecel
• 7,5 Gew.% Alginat / 7,5 Gew% Culminal	• 9,0 Gew.% Methocel
• 15 Gew.% Zell-Leim	

Im Anschluss an die Trocknung wurden zunächst eine Sichtprüfung sowie eine Fotodokumentation durchgeführt, anschließend wurden die Teile mittels 3D-Scan (Revopoint MetroX) erfasst. Die Scandaten in Form einer STL-Datei wurden mit Hilfe eines Python-Scripts mit der Soll-Geometrie (CAD-Daten) verglichen. Hierbei wurden die Abweichungen bestimmt und je Bauteil aufsummiert. Anschließend erfolgte ein Vergleich zwischen den Materialmischungen. Dieser ergab, dass für Benecel® die geringsten Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Geometrie auftreten, gefolgt von Zell-Leim und Methocel®. Die größten Abweichungen traten bei den Alginat-Culminal®-Mischungen auf, wobei ein höherer Culminal®-Anteil zu schlechteren Ergebnissen führte. Dies stützt die vorherigen Beobachtungen, dass reine Culminal®-Pasten für den Druck von Teilen im vorliegenden Maßstab ungeeignet sind.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden auch die Dichten der unterschiedlichen Pasten bestimmt und verglichen. Hierbei zeigte sich, dass für alle Binder die Dichte getrockneter Proben mit dem Binderanteil steigt. Dies liegt an der höheren Dichte aller Binder im Vergleich zur Dichte des Holzpulvers (Klopfdichte: 0,22 g/cm³). Die höchste Dichte wurde für Alginat (0,41 bis 0,45 g/cm³) und die niedrigste für Benecel® (0,29 bis 0,34 g/cm³) bestimmt. Die vergleichsweise hohe Dichte der Alginat-Proben lässt sich durch die vergleichsweise hohe Schrumpfung erklären, welche zum Kompaktieren des Materials führt.

Arbeitspaket 1.3 Maschinenanpassung

Eines der wesentlichen Projektziele war es, den Drucker der TUBAF (WASP 40100 Clay) hinsichtlich der Anforderungen der holzbasierten Pasten anzupassen. Hierbei wurden das Druckbett, die Düsen, eine Kühlung des Extruders zur Vermeidung von Überhitzung sowie die Materialtanks adressiert. Die Notwendigkeit einer Extruderkühlung, welche in der Vergangenheit durch das Anbringen von Kühlakkus gelöst wurde, entfiel bereits zu Projektbeginn, da eine neue Extrudergeneration der Fa. WASP am IMKF zur Verfügung stand, deren Motor nicht mehr zur Überhitzung neigt. Bei den Materialtanks wurden verschiedene Behältergrößen beschafft und erprobt (3; 4,5 & 7,7 l). Für den Druck der Skulpturenteile zeigte sich die mittlere Größe ideal, da sie noch gut von einer Person gehandhabt werden kann und die erreichbaren Bauteilhöhen dem materialbedingten Maximum entsprechen.

Für die Druckbettoberfläche wurden verschiedene Materialien hinsichtlich ihrer Kompatibilität mit holzbasierten Pasten untersucht. Hierzu zählen Holzplatten, Textile, Lochblech, Corian® sowie Beschichtungen mit Kreppband und PE-Folie. Als bestes Druckbett wurde ein Gitterblech mit PE-Folie identifiziert. Die Folie kann nach dem Druck rund um das Bauteil eingeschnitten werden, sodass eine gleichmäßige Schrumpfung möglich bleibt.

Auf Basis von Testdrucken sowie weiterer Optimierungsschleifen während der Fertigung des ersten Prototyps wurden die Druckparameter für die Fertigung von Theaterrequisiten aus holzbasierten Pasten optimiert. Um die erforderliche Detailtreue abbilden zu können, hat sich ein Düsendurchmesser von 4 mm als geeignet erwiesen. Größere Düsendurchmesser können zwar die Druckzeit verkürzen, da der Volumenfluss zunimmt und größere Schichtdicken möglich sind, jedoch zu Lasten einer wesentlich geringeren Auflösung. Kleinere Düsendurchmesser verlängern entsprechend die Druckzeit und bergen zudem ein erhöhtes Risiko für das Verstopfen der Düse. Für 4 mm-Düsen und die Reststofffraktion d < 250 µm traten keine Verstopfungen der Düse auf. In Abstimmung auf den verwendeten Düsendurchmesser hat sich eine Schichthöhe von 2 mm als geeignet gezeigt.

Zum Slicing der Skulpturen hat sich die vorherige Sequenzierung durch Schnitte parallel zur X-Y-Ebene bewährt. Die Teilung erfolgte so, dass sich eine Segmenthöhe von ca. 80 mm ergibt nachdem ein Segment mit folgenden Faktoren skaliert wurde, um die trocknungsbedingte Schrumpfung zu kompensieren: X und Y: 105 %, Z: 122 %. Zudem erfolgte die Sequenzierung so, dass 8°mm Bearbeitungszugabe auf beiden Seiten für das Planschleifen eingeplant sind. Der Querschnitt der Skulpturenteile besteht dann aus den Randschichten und dem Infillbereich (siehe Abbildung 10). Im Hinblick auf Nachbearbeitung und Festigkeit der Skulpturenteile hat sich ein Aufbau mit fünf Randschichten, dem Infilltyp Gitter und einer -dichte von 40 % als am besten geeignet erwiesen.

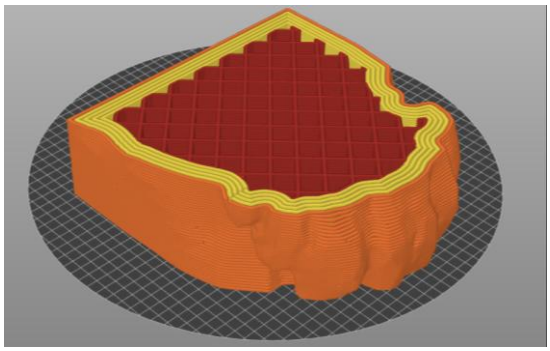


Abbildung 10: Slicing Greif Segment 3 mittels PrusaSlicer 2.9.1

Arbeitspaket 1.4 Nachbearbeitungsmethoden

Die Nacharbeit in der Theaterwerkstatt hat die Ziele, gedruckte Skulpturenteile sauber miteinander zu verbinden, Oberflächen zu glätten und zu beschichten sowie, dort wo nötig, Details herauszuarbeiten. Bereits bevor der erste Prototyp durch die TUBAF gedruckt wurde, wurden durch die STC verschiedene Nacharbeitsmethoden an Holz-Alginat-Compunds erprobt und verglichen.

Es zeigte sich, dass Nacharbeiten nur am getrockneten Objekt sinnvoll sind. Auch wenn im druckfeuchten Zustand Reparaturen oder das Glätten von Oberflächen möglich erscheinen, bedingt die geringe Festigkeit/Stabilität der feuchten Objekte, dass jede Manipulation zusätzlich Verformungen erzeugt. Somit sollten Objekte nach dem Druck bis zur vollständigen Trocknung möglichst wenig bewegt bzw. berührt werden. Lediglich das händische entfernen von „Pastenkrümeln“ die im Prozess von der Düse abfallen, scheint sinnvoll.

An trockenen Probegeometrien wurden verschiedene Methoden der Nachbearbeitung angewandt, darunter Schleifen, Spachteln mit Holzpaste, Sägen mittels Bandsäge sowie Bohren/Fräsen (siehe Abbildung 11 links und Mitte). Hierbei ließ sich feststellen, dass sich das Material hervorragend nachbearbeiten lässt und die klassischen Methoden der Holzbearbeitung uneingeschränkt Anwendung finden können. Auch der Auftrag von Flammschutzmittel und anderen Beschichtungen wurde erprobt ohne, dass Einschränkungen festgestellt wurden (siehe Abbildung 11 rechts).

Abbildung 11: Nachbearbeitungsmethoden für trockene Objekte: Schleifen (links), Bohren (Mitte) und Beschichtung mit HATO® Plast (rechts)

Arbeitspaket 2.1 Auswahl geeigneter Requisiten

Durch das STC wurden vier Sklupturen (Gargoyles) für das Bühnenbild des Theaterstücks „Das Bildnis des Dorian Gray“ als Prototypen ausgewählt. Als "erster" Prototyp sollten zwei der Sklupturen bis Ende Mai 2025 gedruckt und an das STC übergeben werden. Als "zweiter" Prototyp die weiteren zwei Skulpturen mit optimierten Material- und Druckparametern bis Ende 2025 gedruckt und an das STC übergeben werden. Die Abmaße der Skulpturen unterscheiden sich dabei nicht wesentlich. Da die Skulpturen jedoch in mehrere Segmente unterteilt werden mussten, um der möglichen Bauteilhöhe gerecht zu werden, war eine Steigerung der Baugröße im „zweiten“ Prototyp durch die Segmentierung möglich. Somit konnten bei den letzten beiden Skulpturen, weniger, aber dafür größere Segmente durch die TUBAF gedruckt werden.

Abbildung 12: Ausgewählte Skulpturen (v.l.n.r.: Greif, Ork, Skull und Goblin)

Arbeitspaket 2.2 Fertigung der Prototypen

Die Maschinencodes, sogenannte G-Codes, der Prototypen wurden auf Basis der durch das STC zur Verfügung gestellten 3D-Daten gemäß der in AP 1.3 beschriebenen Strategie mit Hilfe der Slicing-Software PrusaSlicer (Release 2.9.1) vorbereitet. Die anschließende Fertigung erfolgte mit einem WASP 40100 Clay Drucker. Durch die Teilung der Skulpturen in einzelne Segmente und eine Trockenzeit von ca. einer Woche je Segment, bei Möglichkeit maximal vier Segmente zeitgleich zu trocknen, waren je Prototyp 3-4 Wochen Fertigungszeit erforderlich. Zudem mussten einige Segmente verworfen und neu gedruckt werden. Gründe hierfür lagen zu Beginn des Projekts in der Einstellung geeigneter Materialrezepturen, die zu Fehldrucken führte, Problemen bei der Abschätzung des notwendigen Materialbedarfs, was zu unvollständigen Objekten führte, und Schimmelbildung während des Trocknungsprozesses. Während die geeigneten Pastenrezepturen, vor allem hinsichtlich des Wasseranteils, nach mehreren Iterationen gefunden wurden, war die Abschätzung des notwendigen Materialbedarfs zeitaufwendiger, da die verarbeiteten Materialmengen aufgrund zahlreicher Faktoren variieren (Luftdruck, Pastenviskosität, Flow-Wert). Kurzfristig konnte dem durch eine Strategie begegnet werden, mit der fehlende Bauteilschichten bestimmt und separat nachgedruckt wurden. Mittelfristig wurde im PrusaSlicer eine konservative Berechnungsformel angelegt, welche sicherstellt, dass stets mehr Paste im Materialtank ist, als final benötigt wird.

Der Schimmelproblematik konnte durch die Zugabe von 25 %iger Essigessenz zur Pastenrezeptur begegnet werden. Dieser Ansatz wurde durch die STC erprobt und die Mindestmenge an Essigessenz wurde mit 2,5 % bestimmt. Somit wurden fortan 2,5 % des Wassers durch Essigessenz substituiert. Seit dieser Anpassung trat kein Schimmel mehr auf und es konnten keine negativen Effekte bzgl. der Verarbeitbarkeit der Pasten festgestellt werden.

Die durch die TUBAF gedruckten und getrockneten Prototypen sind nachfolgend in Abbildung 13 dargestellt und wurden in diesem Zustand an das STC übergeben.

Goblin	Skull	Ork	Greif
Prototyp 1		Prototyp 2	

Abbildung 13: Durch TUBAF gefertigte und an das STC übergebene Skulpturensegmente

Arbeitspaket 2.3 Nachbearbeitung und Fertigstellung der Prototypen

Wie den obenstehenden Bildern zu entnehmen ist, waren umfangreiche nacharbeiten durch das STC notwendig, um die Skulpturensegmente zu einer Skulptur zusammenzusetzen sowie Bühnenreife zu erzielen. Die erforderlichen Schritte sind nachfolgend in Abbildung 14 dargestellt und werden anschließend beschrieben.

Abbildung 14: Nachbearbeitungsschritte am Beispiel der Skulptur "Ork"

Während a) die Oberseite eines Skulpturensegments zeigt, stellt b) den Zustand nach Planschleifen dar, was sich an der ebenen Oberfläche erkennen lässt. Durch die Entfernung der Unebenheiten kommt es bei fehlender Kompensation/Materialzugabe (Prototyp 1) zu unstetigen Übergängen durch fehlende Schichten (siehe c). Nach dem Fügen mit Holzleim, d), wurden die Übergänge mit Holzpaste verspachtelt und damit nachmodelliert (siehe e) und der Treppenstufeneffekt, der aus dem schichtweisen Aufbau resultiert, geglättet (siehe f). Nach der erneuten Trocknung erfolgten der manuelle Feinschliff (g) und die Beschichtung mit HATO®-Plast (h). Die vollständig nachbearbeiteten und abgenommenen Skulpturen sind nachfolgend in Abbildung 15 dargestellt.

Abbildung 15: Fertiggestellte Skulpturen („Gargoyles“) für das Theaterstück "Das Bildnis des Dorian Gray", v.l.n.r.: Ork, Greif und Goblin (vor Beschichtung)

Arbeitspaket 2.4 Langzeiteinsatz auf Bühne

Um zu prüfen, ob die Prototypen einem Einsatz auf der Bühne standhalten, wurden die beiden Skulpturen des ersten Prototyps (Goblin und Skull) über zwei Spielzeiten (1x Freilichtbühne, 1x Indoor) eingesetzt. Es wurden keine wesentlichen Abnutzungs- oder Ermüdungserscheinungen festgestellt, sodass die Erprobung als erfolgreich anzusehen ist (siehe Abbildung 16). Lediglich das linke Ohr des Goblin ist während eines Umbaus abgebrochen, konnte aber repariert werden. Das Feedback der Mitarbeitenden war ebenfalls positiv.

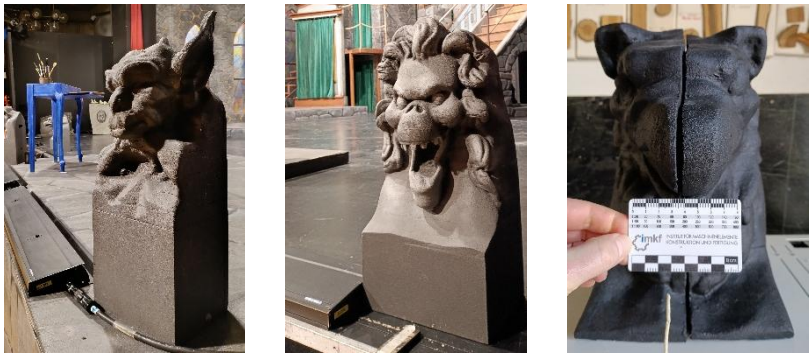


Abbildung 16: Gedruckte Skulpturen im Bühneneinsatz (links: Goblin, Mitte: Skull, rechts: Lagerversuch)

Ein erster Druck der Skulptur Greif konnte nicht für die Bühne genutzt werden. Daher wurde er zweigeteilt und wie gewohnt mit HATO® Plast beschichtet. Eine Hälfte wurde in einer Theaterüblichen Kulissenverpackung (Holzbox) über den Winter 2025/26 draußen gelagert, die andere Hälfte drinnen. Durch die höhere Feuchtigkeit im Außenbereich ist die linke Hälfte (siehe Abbildung 16, rechts) sichtbar größer geworden. Negative Einflüsse auf Festigkeit oder Oberflächenbeschaffenheit konnten jedoch nicht festgestellt werden.

Arbeitspaket 3.1 Optimierung der Trocknung

Zur Verbesserung bzw. Beschleunigung der Trocknung gedruckter Strukturen wurden Lösungen, die in anderen Branchen zum Einsatz kommen recherchiert, deren Übertragbarkeit bewertet und zum Teil in Vorversuchen erprobt. Durch die Recherche wurden die folgenden Ansätze bestimmt:

- Heißlufttrocknung (z.B. in Lebensmittelindustrie zur Trocknung von Gemüseprodukten)
- Mikrowellentrocknung (z.B. Lebensmittelindustrie und Landwirtschaft)
- Vakuumtrockung (z.B. Lebensmittelindustrie, schonende Trocknung durch abgesenkte Verdunstungstemperatur)
- Infrarottrocknung (z.B. Bauindustrie, gezielte Trocknung durch direkte Bestrahlung)

Während die Vakuumtrocknung zwar vielversprechend wirkt, jedoch nicht erprobt werden konnte, da ein entsprechender Ofen nicht zur Verfügung stand, wurde die Infrarottrocknung als ungeeignet bewertet. Durch die komplexe Geometrie der Skulpturensegmente, können nicht alle Bereiche gleichmäßig bestrahlt

und damit getrocknet werden, sodass mit Verzug zu rechnen ist. Zur Mikrowellentrocknung wurden durch das STC einige Vorversuche mit einer konventionellen Küchenmikrowelle durchgeführt um geeignete Leistungen und Trockenzeiten zu bestimmen (siehe Abbildung 17). Es wurden zudem die schichtweise Trocknung mit der Bestrahlung vollständig gedruckter Strukturen verglichen (siehe Abbildung 18).

Abbildung 17: Vorversuche Mikrowellentrocknung t = 4 min (v.l.n.r.: 600 W, 440 W und 270 W)

Die Versuche mit unterschiedlichen Leistungen und Bestrahlungszeiten zeigten, dass bei höheren Leistungen eine geringere Trocknungszeit benötigt wird und die Struktur der Materialproben nach der Trocknung, unabhängig von der Leistung, ähnlich ist. Alle Proben zeigten eine eher poröse, „aufgeschäumte“ Struktur, die durch das Verdampfen des eingeschlossenen Wassers zu erklären ist.

Abbildung 18: Vorversuche "Kompletttrocknung" (links) vs. schichtweise Trocknung (Mitte und rechts)

Ein Vergleich der beiden Strategien „Kompletttrocknung“ und schichtweise Trocknung verdeutlicht, dass eine schichtweise Bestrahlung eine größere Formstabilität ermöglicht, da bei der Extrusion höherer Schichten die unteren bereits verfestigt sind. Nachteilig sind hingegen der hohe zeitliche Aufwand und das wiederholte Handling des Druckbetts zur schichtweisen Trocknung. Zudem werden die ersten Schichten eines Drucks wiederholt der Mikrowellenstrahlung ausgesetzt, was bis zur Entzündung führen kann (siehe Abbildung 18, rechts). Grundsätzlich wirkt eine Beschleunigung der Trocknung durch den Einsatz von Mikrowellen interessant, jedoch würde die Integration der Technik in einen MEX-Drucker ein eigenständiges Entwicklungsprojekt darstellen, dessen erforderliche Kapazitäten im Rahmen dieses Vorhabens nicht gegeben sind. Zudem zeigten Alade et al. für Holz-Natronwasserglas-Pasten, dass der Einsatz von Mikrowellen zwar eine sehr hohe Extraktions-/Trocknungsrate ermöglicht, jedoch die Biegefestigkeit und Härte signifikant niedriger sind, als bei schonenderen Trocknungsmethoden (Alade et al.: „Effects of Postmanufacture Conditioning on the Mechanical and Hygroscopic Properties of Extrusion Printed Wood–Sodium Silicate Composites“, 10.13073/FPJ-D-24-00018.). Die poröse Struktur der Holz-Alginat-Proben deutet darauf hin, dass dieser Effekt hier ebenfalls auftritt (vgl. Abbildung 17).

Die Heißlufttrocknung ist eine Strategie, die durch Nutzung eines Umluftofens möglich wird und sowohl an der TUBAF (Klimaschrank und Trockenofen) als auch am STC (Dörrofen) zum Einsatz kam. Im Rahmen des Vorhabens wurden verschiedene Trocknungsstrategien an gedruckten Skulpturensegmenten getestet.

An der TUBAF standen zur Trocknung, neben einem Ventilator zur Unterstützung der Trocknung bei Raumatmosphäre, ein klassischer Trocknungsofen (BD 240, BINDER GmbH) sowie ein Klimaschrank (ICH110,

Memmert GmbH + Co. KG), bei dem neben der Temperatur auch die Luftfeuchtigkeit und -zirkulation geregelt werden können, zur Verfügung. Es wurden die folgenden Trocknungsregime eingesetzt und untersucht:

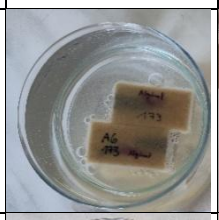
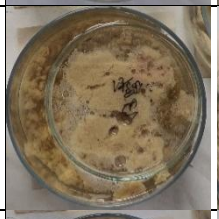
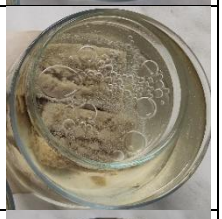
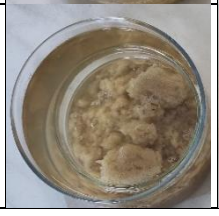
- Raumatmosphäre mit und ohne Ventilator
- Langsame Trocknung im Klimaschrank (kontinuierliche Erhöhung der Temperatur und Reduzierung der Luftfeuchtigkeit)
- Schnelle Trocknung im Ofen (60°C unmittelbar nach dem Druck)
- 24 h Lufttrocknung mit Ventilator, anschließend Klimaschrank (50°C, 10 % Luftfeuchtigkeit, 50 % Lüfterdrehzahl)

Als Ergebnis der Untersuchungen lässt sich festhalten, dass sowohl eine sehr schnelle Trocknung mit hohen Temperaturen unmittelbar nach dem Druck, als auch eine sehr langsame Trocknung nachteilig sind. Während eine langsame Trocknung die Bildung von Schimmel fördert, führt eine zu schnelle Trocknung zu starkem Verzug und Rissen. Für die Fertigung des zweiten Prototyps wurde daher als derzeit beste Trocknungsmethode ein Regime gewählt, bei dem die Skulpturenteile zunächst für 24 h bei Raumatmosphäre gelagert werden, während ein Ventilator für kontinuierliche Luftzirkulation und einen Abtransport der feuchten Luft führt. Im Anschluss wurden die Teile im Klimaschrank bei 50°C, einer Luftfeuchtigkeit von 10 % und einer Lüfterdrehzahl von 50 % weitergetrocknet, bis Massenkonstanz erreicht war. Dies war in Abhängigkeit von der Geometrie der Skulpturenteile und dementsprechend dem eingesetzten Materialvolumen nach fünf bis sieben Tagen der Fall.

Arbeitspaket 3.2 Recyclierversuche mit Probekörpern

Die Rezyklierbarkeit der Holz-Binder-Compounds wurde im Rahmen des Vorhabens detailliert untersucht. Dabei wurden zwei verschiedene Aufbereitungsstrategien verfolgt. Zum einen die mechanische Zerkleinerung in einer Kreuzschermühle und zum anderen das Auflösen in Wasser. Letztere Strategie wurde zunächst in Form von Lösungsversuchen für alle fünf betrachteten Bindemittel angewandt, sowohl mit kaltem als auch heißem Wasser (100 °C).

Tabelle 4: Lösungsverhalten je nach Binder im kalten Wasser

Lagerzeit	Alginat	Culminal®	Zell-Leim	Benecel®	Methocel®
1 h					
24 h					
96 h					

Zur Ermittlung der Löslichkeit in kaltem Wasser wurde je Binder ein zuvor zerstörend geprüfter Biegebalken (Binderanteil 6,5 vol.%) zunächst für 24 Stunden bei 100°C vorgetrocknet, um gleiche Ausgangsbedingungen für alle Proben zu gewährleisten. Anschließend wurden die zwei Balkenhälften in ein Becherglas ge-

legt, mit 300 ml kaltem Leitungswasser übergossen und durch einen Glasdeckel vollständig unter die Wasseroberfläche gedrückt. Die Löslichkeit der Probekörper wurde in regelmäßigen Abständen per Foto festgehalten, bis die Proben eine Woche im Wasser waren (siehe Tabelle 4).

Die Ergebnisse zeigen, dass Culminal®, Benecel® und Methocel® bereits nach einer Stunde deutliche Auflösungserscheinungen in Form von Sedimentation aufweisen. Bei Alginat ist dies erst nach 24 Stunden zu beobachten, während die Zell-Leim-Probe auch nach 96 Stunden sowie einer Woche ihre Form weitestgehend (Rissbildung) behält. Nach einer Woche Lagerung im Wasser zerfielen alle Proben vollständig beim Rühren mittels eines Löffels.

Analog zur Vorgehensweise mit kaltem Wasser wurden in einer zweiten Versuchsreihe Probekörper mit kochendem Wasser übergossen, um den Einfluss der Wassertemperatur auf das Lösungsverhalten zu bestimmen. Hierbei wurden die Proben jedoch nur über einen Zeitraum von 30 min im Wasserbad gelagert und betrachtet. Nach den 30 min erfolgte zunächst eine Sichtprüfung, anschließend wurde geprüft, ob ein Umrühren mit Hilfe eines Löffels den Lösungsprozess beschleunigt. Zudem wurde das Aufweichen der Probekörper geprüft, indem versucht wurde, die Balken mit dem Löffel zu zerteilen.

Die Ergebnisse zeigten keine wesentliche Beschleunigung der Auflösung durch den Einsatz von kochendem Wasser, da nach 30 Minuten keine Sedimente gelöst wurden. Das Rühren zeigte, dass die Randschichten der Alginat-Probe ausreichend aufgeweicht sind, um Sedimente zu lösen. Bei den anderen Bindern war dies nicht der Fall. Trotz dessen war die Restfestigkeit der Proben aus Alginat und Benecel® so hoch, dass eine Zerteilung nicht möglich war. Die drei anderen Proben waren hingegen soweit aufgeweicht, dass eine Zerteilung möglich war.

Abschließend kann aus den Lösungsversuchen gefolgert werden, dass alle fünf Binder grundsätzlich reversibel einsetzbar sind und eine Lösung gedruckter Strukturen funktioniert. Dabei ist die Geschwindigkeit abhängig vom Bindemittel, kann bei großen Strukturen kaum beeinflusst werden und für alle Binder sind mehrere Tage Einwirkdauer einzuplanen.

Für Alginat wurde zusätzlich der Einfluss des Recyclings auf Biegefestigkeit und -dehnung untersucht. Hierzu wurden zunächst Biegebalken aus Holzreststoff und Alginat (15 Gew.%) gedruckt und getestet. Die eine Hälfte der zerstörten Balken (n = 28) wurde mechanisch in einer Kreuzschermühle zerkleinert und unter Zugabe von Wasser erneut zu einer Paste verarbeitet, aus der Biegebalken gedruckt wurden (n = 16). Die zweite Hälfte wurde unter Zugabe von Wasser gelöst. Dabei wurde die Masse nach einer Einwirkzeit von 24 h in einem Laborrührer geknetet. Die eingesetzte Wassermenge war auf die Zielfeuchtigkeit der Paste abgestimmt, sodass anschließend 18 Biegebalken gedruckt werden konnten. Für das Auflösen in Wasser konnte ein zweiter Recycling-Zyklus mit n = 9 umgesetzt werden. Da beim Schleifen der Prüfkörper eine erhebliche Materialmenge (≈ 40 %) abgenommen wird, war kein weiterer Recycling-Zyklus umsetzbar. Die Ergebnisse in Abbildung 19 zeigen jedoch, dass bereits beim zweiten Zyklus eine signifikante Abnahme der mechanischen Eigenschaften eintritt.

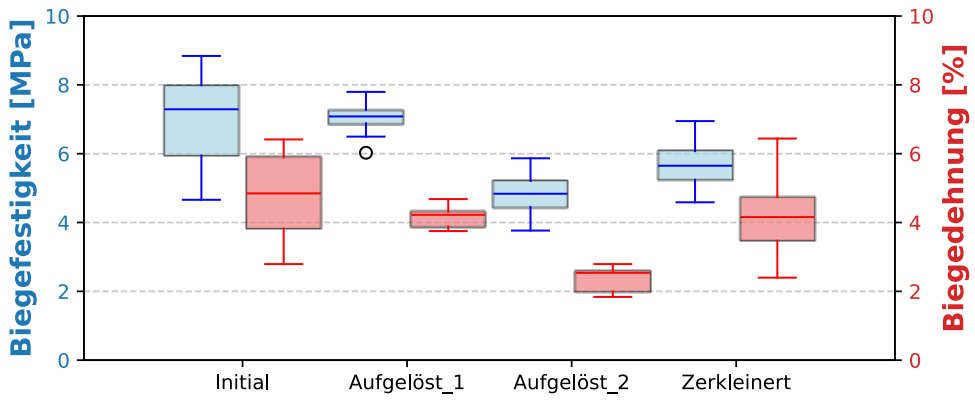


Abbildung 19: Entwicklung von Biegefestigkeit und -dehnung bei Recycling

Während die Biegefestigkeit nach dem ersten Lösungs-Zyklus konstant blieb und sogar weniger Schwankungen aufwies, zeigt sich eine deutliche Reduktion nach dem zweiten Zyklus (≈ - 30 %). Auch die Biegedehnung zeigt eine deutliche Abnahme (Initial zu 1. Auflösung: - 13 %, 1. Auflösung zu 2. Auflösung: - 44 %) vom ersten zum zweiten Recycling-Zyklus, was einer Versprödung des Materials entspricht. Bei der mechanischen Zerkleinerung zeigt sich bereits im ersten Recycling-Zyklus eine Reduktion der Biegefestigkeit um 19 % und der Biegedehnung um 15 %. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass ein 100 %iges Recycling gedruckter Strukturen nicht möglich ist, da die Materialeigenschaften in Folge der Aufbereitung verschlechtert werden. Zur Kompensation dieser Entwicklung sind jedoch die zusätzliche Zugabe von Bindemittel oder auch des Holzreststoffs denkbar und sollten zukünftig untersucht werden. Während bei der Zugabe zusätzlichen Binders mit einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften zu rechnen ist, muss der Einfluss auf Schrumpfungsverhalten und Verzug geprüft werden.

Arbeitspaket 3.3 Erprobung von Flammschutzmitteln

Das STC hat im Vorhaben drei verschiedene Flammschutzmittel hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit als Additiv in der Holzpaste erprobt (siehe Tabelle 5). Dazu wurden die in flüssiger Form vorliegenden Substanzen zur Herstellung von Pasten mit Holzreststoff und Alginat verwendet, indem statt Wasser als Lösungsmittel genutzt wurden oder einen Teil des üblichen Wassers substituierten. Hierbei zeigte sich, dass die Zugabe von Flammschutzmittel einen erheblichen Einfluss auf Viskosität und Beschaffenheit der Pasten hat. Während FLORIMP® keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte, da es den Materialzusammenhalt verhinderte, konnten mit COLORIMP® und BIORETARD® verarbeitbare Pasten hergestellt werden. Im Rahmen der Versuche des STCs zeigte sich jedoch, dass die Flammschutzmittel eine beschleunigte Trocknung in der Mikrowelle negativ beeinflussen, da bereits nach einer Minute ein verkohlen einsetzt. Hierbei kam es aber zumindest nicht zur Entflammung des Materials. Im Rahmen der Prototypenherstellung wurde sich allerdings für einen Druck ohne Flammschutzmittel entschieden, sodass der Flammschutz durch eine nachträgliche Beschichtung eingestellt wurde (siehe AP 2.3).

Tabelle 5: Vergleich potentieller Flammschutzmittel

FLORIMP®	COLORIMP®	BIORETARD®
Als Lösungsmittel	Substituiert 1/3 des Wassers	Substituiert 1/3 des Wassers
Kaum/wenig Haftung, bröckelig	Gute Haftung und Formbarkeit	Mittelmäßige Haftung, leicht bröcklig/sandig
Keine Verarbeitung möglich	Material verkohlt nach 1 Minute in der Mikrowelle (600 W), ohne Flammenbildung	Material verkohlt nach 1 Minute in der Mikrowelle (600 W), ohne Flammenbildung

Arbeitspaket 3.4 Optimierung von Nachbearbeitungsmethoden

Im Rahmen der Nachbearbeitung der vier Skulpturen erfolgte eine Optimierung der Methoden, indem die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte dokumentiert und verglichen wurden. Zusätzlich wurden zahlreiche Werkzeuge, vor allem aus der Holzbearbeitung, hinsichtlich einer Eignung ausprobiert. Ergänzend zu der in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschriebenen Methodik wurden vor allem zwei Optimierungen vorgenommen: Die Definition von Bearbeitungszugaben für den Druck der Segmente und der Einsatz einer NanoBlade-Säge.

Durch die Festlegung von Bearbeitungszugaben auf Basis der Erfahrungen aus Prototyp 1 konnte sichergestellt werden, dass die Segmente nach dem Planschleifen keine unsteten Übergänge aufweisen und die Ausbesserung/Nachmodellierung der Übergänge mit deutlich reduziertem Aufwand verbunden ist.

Als weitere Optimierung ist die Nutzung einer NanoBlade-Säge (Bosch EasyCut 12) zu nennen. Unter Zuhilfenahme dieses Geräts, dass wie eine Miniatur-Kettensäge funktioniert, können sowohl Trennaufgaben, vor allem aber das Glätten der Oberflächen erfolgen. Zuvor war der Aufwand zur Glättung des im 3D-Druck üblichen Stufeneffekts vor allem an gekrümmten Flächen erheblich, da dieser nur manuell mittels Schleifpapiers erfolgen konnte (siehe Abbildung 14, g). Die Nutzung der NanoBlade-Säge sorgt für eine deutliche Beschleunigung dieses Nacharbeitssschritts, auch an Details.

Arbeitspaket 4.1 Bestandsaufnahme am Theater

Für die Implementierung der additiven Fertigung mit Holzpasten in die Werkstätten des STC wurden zunächst die erforderlichen Maschinen und Medien entlangnder Prozesskette bestimmt (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Übersicht über erforderliche Maschinen und Medien

Maschinen	Medien
Siebmaschine (Batch oder kontinuierlich)	Wasseranschluss
Waage	(Druckluft)
Küchenmaschine	
MEX-CRB-Drucker	
Trockenschrank/Dörrofen	

Vor der additiven Fertigung steht zunächst die Aufbereitung des Holzreststoffs sowie die Zubereitung druckfähiger Pasten an. Zur Aufbereitung ist das Sieben mit einer Maschenweite von 250 µm nötig, um die für den Druck erforderliche feine Fraktion von groben Spänen und Verunreinigungen zu trennen. Dies kann entweder in einem klassischen Siebturm oder für größere Mengen mit einer kontinuierlichen Siebanlage erfolgen. Im Anschluss erfolgt das Dosieren der Inhaltsstoffe (Holzreststoff, Bindemittel und Wasser) mit Hilfe einer Waage. In einer Mischmaschine muss die Paste ausreichend zu homogenisiert werden.

Für das MEX-CRB von Theaterrequisiten wird dann ein Drucker benötigt, der die anvisierten Dimensionen des STC unterstützt (50x50x50 cm³). Je nach Drucker-Model ist ggf. ein Druckluftanschluss erforderlich. Die anschließende Trocknung sollte zum Teil in einem Trockenschrank/-ofen erfolgen, um den gedruckten Strukturen die Feuchtigkeit zu entziehen (siehe AP 3.1).

Hinsichtlich der Räumlichkeiten steht dem Vorhaben ein ca. 100 m² großer Raum zur Verfügung. Die Größe ist ausreichend und auch die erforderlichen Medien (Wasser und Druckluft) liegen vor Ort an.

Arbeitspaket 4.2 Konzeptentwicklung anhand der Prozessschritte

Zur Umsetzung der additiven Fertigung von Theaterrequisiten aus Holzreststoffen soll die gesamte Prozesskette in den Werkstätten des STCs realisiert werden. Diese gliedert sich in die nachfolgend aufgeführten Schritte (siehe Abbildung 20).

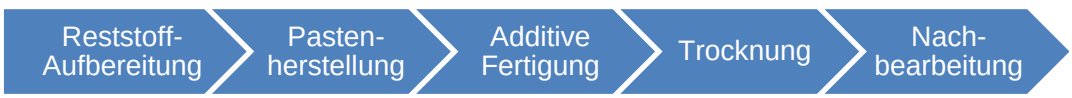


Abbildung 20: Prozesskette zur additiven Fertigung mit Holzreststoffen

Für jeden Prozessschritt gibt erforderliche Maschinen mit welchen die Verarbeitung des Reststoffs erfolgt. Dabei gibt es für viele Aufgaben auch kostengünstige Alternativen zu industriell etablierten Lösungen, da der 3D-Druck am STC eine Ergänzung des bestehenden Betriebs darstellt und von der konventionellen Fertigung abgesichert wird. Anschließend werden je Prozessschritt Lösungsmöglichkeiten beschrieben, verglichen und eine Auswahl getroffen.

Zur Reststoff-Aufbereitung, welche in Form einer Siebung zur Entfernung der Grobfraktion (> 250-400 µm) erfolgt, stehen verschiedene Alternativen zur Verfügung. Kommerziell existieren sowohl Siebmaschinen für Siebtürme (Batch) als auch kontinuierliche Siebmaschinen. Bei Auswahl eines europäischen Herstellers ist mit Kosten im niedrigen fünfstelligen Bereich zu rechnen. Als kostengünstige Alternative wurde durch das STC ein Eigenbau für die Batch-Siebung gebaut. Hierzu wurde ein Metallfass mittig geteilt und mit einem Sieb (300 µm) versehen. Nach dem Befüllen der einen Hälfte, kann das Fass wieder verschlossen und auf einer Rüttelplatte montiert werden, welche die erforderliche Vibration zur Siebung erzeugt. Auf diese Weise können Chargen von 1-2 kg aufbereitet werden. Da die nachfolgende Herstellung der Pasten auch Batch-weise erfolgt, ist dieses Vorgehen zweckmäßig und geeignet.

Da für die Dosierung der Pastenkomponenten eine Genauigkeit im Bereich ganzer Gramm ausreichend ist und Mengen bis 3 kg in der Regel nicht überschritten werden, kann eine kostengünstige Haushaltswaage genutzt werden. Die Mischung der Komponenten erfolgt an der TUBAF mit Hilfe einer industriellen Knet-maschine, die auch für hohe Lasten geeignet ist (Fa. Geolab, Heavy Duty). Für die hier eingesetzten Holz-pasten kann allerdings auch eine Küchenmaschine genutzt werden, welche für 200 bis 300 € erworben werden können.

Die Auswahl eines geeigneten 3D-Druckers erfolgte auf Basis der Anforderungen des STC, der fachlichen Expertise der TUBAF und der Möglichkeit vorab Druckversuche mit Holzpasten durchführen. Um einem kubischen Bauraum von mindestens 50x50x50 cm³ gerecht zu werden wurde der Stone Flower V einer Ausgründung der TU München ausgewählt und nach ersten Druckversuchen mit der Holzpaste beschafft (siehe Abbildung 21). Zur Trocknung wurde als kostengünstige Alternative zu einem Ofen ein Dörrautomat ausgewählt, welcher die Trocknung bei 50-60 °C und Umluft ermöglicht.

Abbildung 21: Geräte des STC (links: Küchenmaschine K-Mix, Kenwood; Mitte: Stone Flower V, rechts: Trocknung einer Skulptur im Dörrautomat, Fa. ggm gastro)

Das beschriebene Gesamtkonzept wurde schrittweise beim STC umgesetzt, sodass zum Projektende eine selbstständige Verarbeitung der eigenen Holzreststoffe zu Theaterrequisiten möglich war.

Arbeitspaket 5 Management, Schutzrechte, Außendarstellung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden monatliche Projekttreffen in Präsenz, zwischenzeitliche Abstim-mungen und Aktivitäten zur Außendarstellung koordiniert. Die Anmeldung von Schutzrechten wurde eben-falls geprüft, jedoch konnten keine schutzbedürftigen Inhalte identifiziert werden.

Nach einem Kick-off Meeting in den Werkstätten des STC, wurden monatliche Projektmeetings an der TUBAF durchgeführt, in denen sich die Projektmitarbeitenden zum aktuellen Stand der Arbeiten austausch-ten und Materialproben, Probekörper, Anschauungsobjekte und Prototypen übergeben wurden. Der Pro-jektabschluss fand am 26.02.2026 erneut in den Werkstätten der STC statt.

Am 15.10.2025 stellte Dipl.-Ing. Leif Bretschneider beim 12. Mitteldeutschen Forum 3D-Druck in der An-wendung an der Hochschule Mittweida aktuelle Projektergebnisse in Form eines Posters vor. Unter dem Titel „Mit additiver Fertigung zur Kreislaufwirtschaft im Theaterkulissenbau– Potentiale und Herausforde-rungen des MEX-CRB mit Holzreststoffen“ wurden die Prozesskette zur Fertigung der Skulpturen sowie die Untersuchungen von Bindern und Recyclingfähigkeit dargestellt (http://dx.doi.org/10.25673/120741).

Das STC veranstaltete am 4.12.2025 einen Anwenderworkshop für Theaterschaffende, indem die Ergebnisse des Projekts zunächst in einer Präsentation vorgestellt und anschließend eine Live-Demonstration der additiven Fertigung mit dem Stone Flower V gegeben wurden (siehe Abbildung 22). Rund 25 Theaterschaffende sowie Wissenschaftler kamen zu einem intensiven fachlichen Austausch zusammen, um über Potenziale und Herausforderungen der Pastenextrusion von Holzspänen für die Herstellung von Theaterkulissen zu diskutieren.

Abbildung 22: Anwenderworkshop in der Werkstatt des STC

2.2 Erreichte Meilensteine

Meilensteine Gesamtprojekt

Beschreibung: messbare Zielparameter, Steuerungsfunktion	Nr.	geplanter Monat	realer Monat	Erläuterung (planabweichend/nicht erreicht)
Erster kleiner Prototyp (Durchmesser < 0,4 m) ist fertiggestellt und bühnenreif.	2	6	9	Da seitens TUBAF erst mit Verspätung Projektpersonal gefunden und eingestellt werden konnte, mussten Arbeitsinhalte zeitlich verschoben werden.

Meilensteine Teilprojekt A

Beschreibung: messbare Zielparameter, Steuerungsfunktion	Nr.	geplanter Monat	realer Monat	Erläuterung (planabweichend/nicht erreicht)
Material- und Maschinenanpassung ist für neues Material und kleinen Prototypen abgeschlossen.	1	3	7	Siehe Meilenstein Nr. 2 (oben).
Materialoptimierung für Holzreststoff und großen Prototypen ist abgeschlossen.	3	13	13	-

Meilensteine Teilprojekt B

Beschreibung: messbare Zielparameter, Steuerungsfunktion	Nr.	geplanter Monat	realer Monat	Erläuterung (planabweichend/nicht erreicht)
Zweiter großer Prototyp ist ausgewählt. Bestandsaufnahme für die bisherigen Möglichkeiten ist abgeschlossen.	4	13	13	-

2.3 Erreichte Ergebnisse

2.3.1 Erreichung der Gesamtziele

Gesamtziel des Innovationssprints	Das Ziel des Gesamtvorhabens ist es, Theaterrequisiten als Prototyp mittels optimierter und angepasster additiver Fertigung herzustellen und auf der Bühne zu erproben.	Das ursprüngliche Gesamtziel konnte erreicht werden, denn eine Weiterentwicklung des Reststoff-basierten Druckmaterials und des Verarbeitungsprozesses wurden durchgeführt und in Prototypen erprobt, welche auf der Bühne zum Einsatz kamen.
Beitrag des Teilprojekts A	Das Ziel des Teilprojektes A ist die erfolgreiche Material- und Maschinenanpassung sowie additive Fertigung von Requisiten aus Holzreststoffen mittels Pastenextrusion. Außerdem erfolgt die Entwicklung eines Konzeptes zur Implementierung des Fertigungsverfahrens und seiner Prozesskette in der Theaterwerkstatt.	Durch Untersuchung verschiedener Bindemittel und Pastenrezepturen, konnte ein geeignetes Druckmaterial entwickelt werden. Ebenfalls wurden die Maschine und deren Prozessparameter optimiert. Auf dieser Basis wurden Bühnenreife Theaterkulissen additiv gefertigt. Ein Konzept zur Realisierung der Prozesskette beim STC wurde erarbeitet und umgesetzt, sodass zukünftig selbstständig Theaterkulissen aus Reststoffen additiv gefertigt werden können. Das Ziel des Teilprojekts A ist dementsprechend voll erfüllt.
Beitrag des Teilprojekts B	Ziel des Teilprojektes B ist die erfolgreiche End- bzw. Nachbearbeitung von 3D-gedruckten Requisiten sowie deren Einsatz auf der Bühne. Darüber hinaus soll der Einsatz von Flammschutzmitteln zur Erreichung der Brandschutzbestimmungen geprüft und etabliert werden.	Die ursprünglichen Ziele des Teilprojekts wurden vollständig erfüllt. Eine effiziente Nachbearbeitung konnte im Rahmen der Prototypen etabliert werden. Verschiedene Branchenübliche Flammschutzmittel wurden hinsichtlich ihrer Verarbeitung im 3D-Druck sowie als Beschichtung untersucht und eine Vorzugslösung wurde etabliert.

2.3.2 Erreichung der wissenschaftlichen und/oder technischen Arbeitsziele

Geplante konkrete Arbeitsziele: Gesamtprojekt	Erfüllung
Es sind umfangreiche Materialanpassung (mind. jeweils 2 Variationen der Partikelgrößenverteilung, des Binder- und Feuchtigkeitsgehaltes) und Maschinenanpassung (Druckbett, Düse, Kühlung des Extruders, Materialbehälter, etc.) auf Materialextrusion mit pastösem Material aus Holzreststoff und Alginat abgeschlossen	Eine ausführliche Untersuchung zur Materialanpassung ist erfolgt (2 Partikelgrößen, 5 Bindemittel, 3 Binderanteile). Eine Maschinenanpassung bzw. Optimierung erfolgte ebenfalls mit Fokus auf die genannten Komponenten. Eine Kühlung des Extrudermotors musste nicht betrachtet werden, da ein neu erworbener Extruder keine Überhitzungsproblematik hatte.
Die gesamte Prozesskette wird hinsichtlich der Anforderungen an Theaterkulissen optimiert (auch Materialvorbereitung und -nachbereitung).	Eine optimale Prozesskette zur additiven Fertigung von Theaterkulissen aus Holzreststoffen wurde identifiziert und etabliert.

Geplante konkrete Arbeitsziel: Teilprojekt A	Erfüllung
Erzeugung von mind. 100 l für die Verarbeitung nutzbares Holzpulver aus Reststoff von Theater Chemnitz.	Im Rahmen des Projekts wurden über 600 l Holzreststoffe entsprechend den Anforderungen des 3D-Drucks aufbereitet.
Ermittlung mind. eines geeigneten Trocknungsprozesses für die Anwendung im Theater	Es wurden fünf verschiedene Trocknungsregime erprobt und verglichen. Zudem wurden Vorversuche zum Einsatz von Mikrowellen durchgeführt. Das am besten geeignete Trocknungsregime wurde identifiziert.
100 % Wiederverwendbarkeit anhand von mind. 5-maligen Kreislaufversuchen nachgewiesen	Im Vorhaben wurden Versuche zur Recyclingfähigkeit durchgeführt. Bei schonender Aufbereitung konnten 2 Recyclingzyklen realisiert werden, wobei im zweiten ein Abfall der Festigkeit um 30 % verzeichnet wurde.
Fertigung und Trocknung von 2 Prototyen (klein: Durchmesser < 0,4 m und groß: Durchmesser > 0,4 m)	Zwei Prototypen (jeweils 2 Skulpturen) wurden erfolgreich gedruckt und getrocknet.
Geplante konkrete Arbeitsziele: Teilprojekt B	**Erfüllung**
Erarbeitung von zwei Prototypen als geeignete Kulisse	Zwei Prototypen für Theaterkulissen wurden identifiziert und für die Fertigung vorbereitet.
Ermittlung von mind. 5 geeigneten Nachbearbeitungsmethoden für additiv gefertigte Bauteile.	Es wurden über 5 Nachbearbeitungsmethoden für additiv gefertigte Bauteile erprobt. Eine Prozesskette zur Kombination der Methoden wurde erarbeitet.
Anwendung des kleinen Prototypen (Durchmesser < 0,4 m) in mind. 2 Spielzeiten	Das Arbeitsziel wurde erfüllt. Die beiden Skulpturen wurden durch das STC nachbearbeitet und anschließend auf der Bühne über 2 Spielzeiten eingesetzt.
Gefertigte Probekörper entsprechen den Brandschutzstandard	Die Bühnenreifen Prototypen entsprechen den Brandschutzstandards und konnten entsprechend eingesetzt werden.

2.4 Verwertung

2.4.1 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses

Auch nach dem Vorhaben sind Schritte zur Weiterentwicklung der Innovation notwendig. Während die Nutzung der im Vorhaben erprobten Bindemittel gute Ergebnisse liefert, sollte weitergehend geprüft werden, ob andere Bindemittel erprobt werden können, um den beschriebenen Kompromiss aus Schrumpfung und Festigkeit (siehe AP 1.2) besser zu lösen. Weitere Felder zur Optimierung der Innovation sind die Beschleunigung der Trocknung gedruckter Strukturen sowie das Recycling. Eine weitere Verfolgung des Ansatzes eine Mikrowellentrocknung in den Druckprozess zu integrieren (siehe AP 3.1) scheint interessant. Ebenso kann in einem nächsten Schritt geprüft werden, ob durch Zugabe von sogenanntem Virgin-Material (zusätzlichem Binder) Materialeigenschaften über mehrere Recyclingzyklen konstant gehalten werden können.

Weitere Anwendungspartnerinnen und -partner für die Innovation können über Maßnahmen der Außendarstellung gewonnen werden. Hierzu erfolgten bereits erste Aktivitäten während der Projektlaufzeit. Nachfolgend findet sich die Aktualisierung der ursprünglichen gemeinsamen Verwertungsstrategie:

Die kurzfristige Verwertung dieser Innovation *erfolgte* in der Städtische Theater Chemnitz gGmbH und im speziellen in den Ausstattungswerkstätten unter Leitung von Norbert Richter, wo die Idee umgesetzt und

bewertet *wurde*. Das größte Potential für die Innovation liefert die Umsetzung des Prozesses, welcher mittelfristig auch an weitere Theaterwerkstätten weitergegeben werden soll. Als Innovationsplattform dient die Theatertechnische Gesellschaft (DTHG), wo regelmäßig Regionalgruppentreffen und jährlich eine Bühnentechnische Tagung durchgeführt werden. Dies ist die richtige Plattform, um eine solche nachhaltige und kreislauffähige Lösung vorzustellen. Zudem *wurde* während der Projektlaufzeit ein Workshop *durchgeführt (siehe AP 5), welcher Einblicke in die neue Fertigungsweise sowie eine Live-Demonstration des 3D-Drucks für Theaterschaffende bot. Darüber hinaus wurde ein Konferenzbeitrag geleistet und eine Veröffentlichung ist in Vorbereitung (siehe 2.4.3)*.

Langfristig soll die Idee auch in andere Branchen, wie den Holzbau, den dekorativen Innenausbau etc. übertragen werden. In diesem Bereich gibt es viele lokale Firmen (Holzbau Kompetenz Sachsen GmbH) sowie Vereine & Projekte (Holz-Campus Eibenstock).

2.4.2 Fortschritt Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens

Dem Themengebiet der Pastenextrusion (auch Liquid Deposition Modeling (LDM) oder Direct Inc Writing (DIW) mit umweltfreundlichen Materialien widmen sich verschiedene Arbeitsgruppen. Direkten Einfluss auf die Durchführung dieses Projekt hatte nur die Arbeit von Dr.-Ing. Michael Rosenthal (TU Dresden), denn der durch ihn genutzte Zell-Leim wurde als eines von fünf Bindemitteln betrachtet (siehe AP 1.2).

2.4.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Bretschneider, Leif; Zeidler, Henning: Mit additiver Fertigung zur Kreislaufwirtschaft im Theaterkulissenbau – Potentiale und Herausforderungen des MEX-CRB mit Holzreststoffen, Konferenzbeitrag, 12. Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung, Hochschule Mittweida, 15.10.2025, http://dx.doi.org/10.25673/120741

Eine Journalpublikation mit dem Arbeitstitel „Investigation on utilizing wood working residues with bio-based binders in Material Extrusion - Chemical Reaction Bonding (MEX-CRB) for Circular Economy Applications“ ist in Vorbereitung und wird zeitnah bei einem Peer-review Journal eingereicht.

2.4.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Die geleistete Projektarbeit war sowohl notwendig als auch angemessen. Die Notwendigkeit ergab sich aus der Tatsache, dass im Theateralltag derzeit viele Materialien zum Einsatz kommen, die eine schlechte Umweltwirkung besitzen und zudem nicht recycelt werden können, sodass nach jeder Spielzeit viel Abfall entsteht. Die Entwicklungsarbeit dieses Vorhabens adressierte diese Problematik durch die Erprobung eines Alternativen Fertigungsprozesses unter Nutzung eigener Holzbasierter Reststoffe, um Kreislauffähige Theaterkulissen additiv herstellen zu können. So konnte anhand der Prototypen gezeigt werden, dass ein nachhaltiger Kulissenbau möglich ist und es lohnenswert ist, die entwickelten Prozesse zu etablieren und zu verbreiten.

Da es sich bei der Partnerschaft zwischen TUBAF und STC um ein lokales sächsisches Bündnis handelt, kam eine Förderung durch die EU nicht in Frage. Es galt eine Förderung auf Landes- oder Bundesebene zu finden. Durch die DATIpilot-Förderung konnte das STC, als gemeinnützige GmbH ohne Forschungs- und Entwicklungsbudgets, in die Lage versetzt werden, eine solches Forschungsprojekt aktiv zu bestreiten.

Die Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit ergibt sich aus den erreichten Ergebnissen. Beide Partner konnten im Rahmen der 18-Monatigen Laufzeit Kompetenzen zum Umgang mit Holzreststoffen und deren additiver Verarbeitung zu Theaterkulissen erwerben. Während die TUBAF den Stand der Technik bzgl. einsetzbarer Bindemittel und deren Einflüsse auf die Verarbeitungs- und Eigenschaften sowie der Recyclingfähigkeit von Holzreststoff-Alginat-Gemischen erweitern konnte, hat sich das STC befähigt, die gesamte Prozesskette, von der Materialaufbereitung über die additive Fertigung mittels Pastenextrusion bis hin zu Nachbearbeitung und Brandschutz, abzubilden. Dies sind in Anbetracht der Förderdauer beachtliche Ergebnisse.