

## Schlussbericht

<p><b>Vorhabenbezeichnung:</b>          3D-ThermoCell - Strukturstabile ressourcenschonende Verpackungslösungen aus 3D-thermogeformten Cellulose-Verbundwerkstoffen aus biobasierten Papierinhaltsstoffen</p>
<p><b>Ausführende Stellen/Zuwendungsempfänger:</b>          Duale Hochschule Baden-Württemberg, Karlsruhe: Förderkennzeichen - 031B1090A          Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie: Förderkennzeichen - 031B1090B          Tecnaro GmbH: Förderkennzeichen - 031B1090C          Mainteam Bild - Text - Kommunikation GmbH: Förderkennzeichen - 031B1090D          Mack Kunststofftechnik GmbH &amp; Co. KG: Förderkennzeichen - 031B1090E</p>
<p><b>Bearbeiter:</b>          A. Kauffmann, M. Korbmann, S. Reinhard, U. Walz, J. Valkama, D. Eidam, A. Dennard, J. Geerds, M. Schweizer, T. Jung, E. Mack</p>
<p><b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2021 – 30.09.2023</p>
<p><i>„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 031B1090A-E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren“</i></p>

### Inhalt

Abkürzungsverzeichnis .....	2
1 Aufgabenstellung .....	3
2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und des Vorhabens .....	3
3 Durchführung des Vorhabens und erzielte Ergebnisse .....	4
3.1 Arbeitshypothesen und Vorüberlegungen .....	5
3.2 Materialentwicklung, Thermoform-Halbzeuge (AP 1) .....	5
3.2.1 Materialentwicklung Route 1 .....	6
3.2.2 Materialentwicklung Route 2 .....	10

---

3.2.3	Materialentwicklung Route 3 .....	11
3.2.4	Materialentwicklung Route 4 .....	11
3.3	Prozessvalidierung, Thermoform-Halbzeuge (AP 2) .....	13
3.3.1	Halbzeugherstellung Route 1 .....	14
3.3.2	Halbzeugherstellung Route 2 .....	22
3.3.3	Halbzeugherstellung Route 3 .....	25
3.3.4	Halbzeugherstellung Route 4 .....	27
3.4	Verarbeitungsprozess und Industrietransfer (AP 3) .....	30
3.4.1	Thermoformen im Technikumsmaßstab .....	30
3.4.2	Thermoformen im Industriemaßstab .....	36
3.4.3	Fazit aus den vorangegangenen Versuchen und weiteres Vorgehen .....	39
3.4.4	Druck- und Weiterverarbeitungsversuche.....	40
3.5	Verpackungsentwicklung (AP 4).....	51
3.5.1	Design und Technische Zeichnung der Verpackungskonstruktion.....	51
3.6	Demonstratoren-Entwicklung (AP 5).....	55
3.6.1	Demonstrator Route 1 .....	55
3.6.2	Demonstrator Route 4 .....	59
3.7	Bilanzierung und wirtschaftliche Verwertung (AP 6).....	60
3.7.1	Projektbegleitendes Marktmonitoring und Wettbewerbsanalyse.....	60
3.7.2	Ganzheitliche Bilanzierung .....	60
3.7.3	Wirtschaftliche Verwertung .....	65
3.7.4	Marketingkonzept und Verwertungsplan .....	65
3.8	Charakterisierung (AP 7).....	70
3.8.1	Charakterisierung Halbzeug .....	70
3.8.2	Verpackungen / Demonstratoren.....	79
3.9	Projektmanagement (AP 8) .....	83
3.9.1	Projekttreffen.....	83
3.9.2	Transferleistungen / Öffentlichkeitsarbeit.....	84
4	Zusammenfassung und Wertung der Ergebnisse .....	84
5	Zahlenmäßiger Nachweis .....	85
6	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten .....	85
7	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	85
8	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	86
9	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	87
10	Literaturverzeichnis.....	87

## Abkürzungsverzeichnis

BCT	<i>Box Compression Test, Stapelstauchwiderstand</i>
BMBF	<i>Bundesministerium für Bildung und Forschung</i>
CEPI	<i>Confederation of European Paper Industries</i>
CP	<i>Cellulosepropionat</i>
CTMP	<i>Chemical Thermo Mechanical Pulp</i>
ifeu	<i>Institut für Energie- und Umweltforschung</i>
MVR	<i>Siehe, Melt volume flow rate</i>
NBSK	<i>Northern Bleached Softwood Kraft</i>
otro	<i>ofen trocken</i>
PBAT	<i>Polybutyratadipat-Terephtalat</i>
PBS	<i>Polybutylensuccinat</i>
PET	<i>Polyethylenterephtalat</i>
PLA	<i>Polylactid acid</i>
PLAFCO	<i>Plasticized Fibre Composite</i>
PVOH	<i>Polyvinylalkohol</i>
VST	<i>Vicat Softening Temperature</i>

## 1 Aufgabenstellung

Aufgabe des Vorhabens war die Entwicklung von Verpackungslösungen auf Basis von thermoformbaren „Papierwerkstoffen“. Als neuartiges Produkt werden Verpackungen angestrebt, die ausschließlich papierbasiert, zu 100 Prozent aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen und über den aus der Kunststoffverarbeitung bekannten Thermoformprozess zu Bauteilen mit filigranen dreidimensionalen Strukturen umgeformt werden können.

Das Ergebnis sind Verpackungsbauteile, die ähnliche Geometrien und Festigkeiten wie klassische Kunststoffbauteile aufweisen, jedoch bei niedrigerem Gewicht, geringen Kosten und aus nahezu 100% abbaubaren, recyclebaren Papier-Materialien bestehen.

Der Einsatz der neuen Produkte ist zum einen in der Verpackung von Lebensmitteln zu sehen, als zweiter Bereich werden Industrieverpackungen in Form von Leichtbau-Verpackungen bzw. thermogeformter Inlays angestrebt.

## 2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und des Vorhabens

Im Kunststoffbereich sind thermogeformte Verpackungen und Inlays für zahlreiche Packgüter und Anwendungen verbreitet. Bei Einwegbechern stehen mehrere verschiedene biobasierte und mineralölbasierte Materialien miteinander im Wettbewerb.<sup>1</sup>

Für den Prozess des Formpressens und des Thermoformens werden auch naturfaser- und holzfaserverstärkte Thermoplaste entwickelt. Antrieb für diese Verbundstoffe sind die vergleichsweise niedrigen Kosten der Fasern, die niedrigere Masse, bessere Recyclingfähigkeit sowie die Nachfrage nach vollständig oder teilweise biobasierten Produkten.<sup>2</sup>

Papierwerkstoffe für Verpackungen werden über das Falten von Pappe-/Papierhalbzeugen hergestellt (überwiegend für Faltschachteln für den Transport) oder im Faserguss-Verfahren aus Faserbrei geformt (z.B. für Eierkartons oder als schützende Einlegeteile).

Neuere Entwicklungen im Bereich der Papierwerkstoffe gehen vornehmlich in den Bereich der Weiterentwicklung von Faserform-Verpackungen. Diese Verfahren sind jedoch zeit- und energieaufwändig und durch die großen Wandstärken der Produkte mit hohem Materialeinsatz verbunden.

An der DHBW Karlsruhe wurden bereits im Vorfeld im Bereich der biobasierten Verbundwerkstoffe Forschungsarbeiten zu Werkstoffen auf Cellulosebasis durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde bereits der cellulosebasierte, biologisch abbaubare Faserverbundstoff PLAFCO entwickelt. PLAFCO kann als klassisches Halbzeug kostengünstig und in großen Mengen auf herkömmlichen Papiermaschinen hergestellt werden und eignet sich grundsätzlich

---

<sup>1</sup> (Nowack, 2007)

<sup>2</sup> (Oksman Niska, Mathew, Rojas, Sain, & Eds, 2014)

als Kunststoffersatz in Verpackungen. Auch erscheint über Materialmodifikationen und teilweise Plastifizierung eine Umformung möglich. An der DHBW liegen relevante Kompetenzen und Vorarbeiten im Bereich cellulosebasierter Werkstoffe sowie Biopolymere und deren Verarbeitungstechnologien wie insbesondere das Thermoformen vor. Die DHBW Karlsruhe kann auf Erfahrungen und Ergebnisse eines großen europäischen Verbundprojektes (COMPAC in woodwisdom-net) mit dem Ziel der Plastifizierung und Vulkanisierung von Naturfasern zur Erzeugung von Verpackungsmaterialien zurückgreifen. Des Weiteren kann auf Erfahrungen und Ergebnisse interner Arbeiten sowie einem abgeschlossenen BMBF-Projekt zur Werkstoffcharakterisierung und Prozessentwicklung im Bereich des Thermoformens aufgebaut werden. Ein Überblick der bisherigen relevanten Forschungsprojekten ist Tabelle 1 dargestellt.

*Tabelle 1: Auszug aus wissenschaftlichen Projekten an der DHBW mit Bezug zum Thermoformen/ Papier*

Projektträger	Laufzeit	Thema
EU / FNR	2014 - 2017	COMPAC - Cellulose Komposite für Verpackungsmaterialien
DHBW / TU Darmstadt - Promotion	2014 - 2018	All-Cellulose Composites for packaging applications, 2018 TU Darmstadt. Tero Tervahartiala
DHBW / Universität Oulu - Promotion	2015 - 2018	Paper-based composites via the partial dissolution route with NaOH/urea, 2018 Univ. Oulu Finnland, Nils Hildebrandt.
BMBF / PTJ	2017 - 2020	„BioFlip - Bio Foam Light Pallet“ - Hochwertige Leichtpaletten auf Basis geschäumter Biopolymere
BMEL / FNR	2019 - 2022	„Module auf Basis biogener Phasenwechselmaterialien zur natürlichen Temperierung im Transport- und Gebäudewesen. Teilvorhaben: Thermogeformte Makroverkapselung

### 3 Durchführung des Vorhabens und erzielte Ergebnisse

Die inhaltlichen Arbeiten des Vorhabens erfolgten plangemäß, entsprechend des Balkenplans und der in der Vorhabenbeschreibung des Antrags beschriebenen Arbeitspakete. Das Projekt beinhaltet insgesamt acht an einen Zeitplan gekoppelte Arbeitspakete:

- AP 1: Materialentwicklung, Thermoform-Halbzeuge
- AP 2: Prozessvalidierung, Thermoform-Halbzeuge
- AP 3: Verarbeitungsprozess und Industrietransfer
- AP 4: Verpackungsentwicklung
- AP 5: Demonstratoren-Entwicklung
- AP 6: Bilanzierung und wirtschaftliche Verwertung
- AP 7: Charakterisierung
- AP 8: Projektmanagement

### 3.1 Arbeitshypothesen und Vorüberlegungen

Zur Verformung von Cellulose-Erzeugnissen auf Thermoformanlagen ist eine hinreichende Thermoplastizität erforderlich. Im Gegensatz zu konventionellen thermoplastischen Kunststoffen, die im Thermoformverfahren eingesetzt werden, wird Cellulose durch Wärme brüchig. Thermoplaste werden durch Wärme elastisch sowie plastisch verformbar und damit auf Thermoformanlagen umformbar. Die Verarbeitungstemperatur von Thermoplasten liegt zwischen dem Glasübergangspunkt und dem Schmelzbereich. Ein Verformen von Celluloseerzeugnissen auf Thermoformanlagen ist daher nicht ohne Modifizierung möglich.

Um eine Plastifizierung zu ermöglichen wurden verschiedene Wege untersucht. Es sollen entweder Fasern den Kunststoffen zugesetzt werden (siehe Route 1 und 2) oder durch Zusetzen oder Additivieren von (thermoplastischen) Polymeren eine Thermoformbarkeit erreicht werden (siehe Route 3 und 4).

### 3.2 Materialentwicklung, Thermoform-Halbzeuge (AP 1)

Tabelle 2: Übersicht eingesetzte Materialien

	Route 1	Route 2	Route 3	Route 4
	Fasern im Schäumprozess	Geschäumte Polymere im Papierhalbzeug	Fasern aus Polymeren im Papier	Additivierung von Papierhalbzeugen
Cellulosebasiert	Kurzfasern, Langfasern	Langfaser (NBSK)	Langfaser (NBSK)	Cellulose aus Kurzfasern, NBSK (Langfasern)
Polymerbasiert	PLA, PBAT, PBS, CP	PLA, CP, Lignin (auch gemahlen)	PLA	Gelatine, PVOH, Chitosan

Die verschiedenen Lösungsansätze wurden in einer Roadmap für alle Projektmitglieder visualisiert. Aufgeteilt wurde in „4 Routen“, die in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden.

Bei Route 1 werden Polymere mit Cellulosefasern gemischt, um geschäumte Platten herzustellen, die thermogeformt werden könnten.

Bei Route 2 werden kleine Granulate, sogenannte Mikrobeads, beladen und in Papiere eingebracht, um wieder eine bessere Thermoformbarkeit zu erreichen.

Bei Route 3 werden Fasern aus PLA gesponnen, aus denen zusammen mit Cellulosefasern Papiere hergestellt werden.

In Route 4 werden Papiere, d.h. Celluloseerzeugnisse, mit Additiven behandelt, um eine Verarbeitung auf Thermoformanlagen zu ermöglichen.

# Roadmap 3D-Thermocell

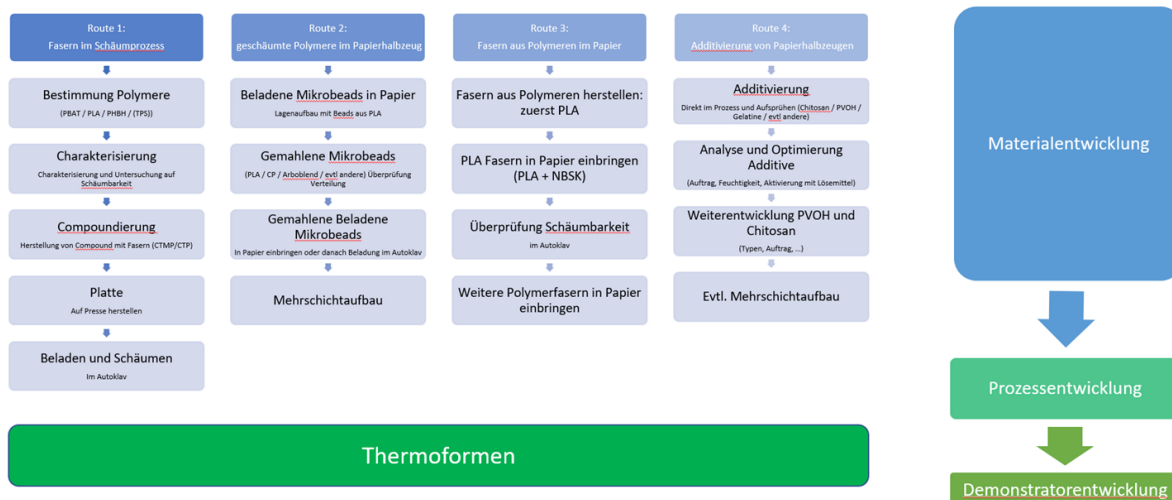


Abbildung 1: Roadmap der Lösungsmöglichkeiten

## 3.2.1 Materialentwicklung Route 1

### 3.2.1.1 Auswahl der Fasern

(DHBW Karlsruhe)

Prinzipiell sind sämtliche Fasern, die es auf dem Markt gibt, potenziell fähig in Schäumprozessen eingesetzt zu werden. Dazu müssen die Fasern in einem ersten Schritt compoundiert werden. Die Voraussetzungen für eine gute Compoundierbarkeit sind trockene Fasern (Feuchtigkeitsgehalt < 10%) und eine gute Rieselfähigkeit. Die Auswahl fokussierte sich zunächst auf Verfügbarkeit und Kosten, um dem Ziel kostengünstig gerecht zu werden.

Eingesetzte Fasern, die für Compoundierversuche recherchiert, beschafft und Tecnaro zur Verfügung gestellt wurden:

Kurzfasern:

- Eukalyptus, ungemahlen als Platte und trocken desintegriert
- Jelu, Type, Jelu-Werk GmbH & Co. KG

Langfasern:

- NBSK (Fichte-Kiefer) Mercer, als Platte und trocken desintegriert
- CTMP, Stücke aus Ballen gebrochen und trocken desintegriert
- Kiefer, gebleicht, als Platte und trocken desintegriert
- Kiefer, ungebleicht, als Platte und trocken desintegriert
- Lyocell FCP 10/300M von der Firma Lenzing
- Rettenmaier Holzfasern

### 3.2.1.2 Auswahl an Polymeren

*(Fraunhofer ICT)*

Aus einer zuvor erstellten Liste von marktverfügbaren Biopolymeren wurden Cellulosepropionat (CP 400-10, Firma Albis), Polylactid (teilkristallin und amorph) und eine Arboblendtype (PLA-basierter Blend, Firma Tecnar) als Favoriten für die angestrebte Anwendung und erste Versuche im Projekt ausgewählt. CP ist ein Ester der Cellulose mit aliphatischen Carbonsäuren und den verwendeten Ausgangsmaterialien im Papierprozess damit ähnlich. Es beinhaltet einen zur Verarbeitung notwendigen Weichmacher (hier 10%). PLA ist ein Polymer, welches aus aneinander gebundenen Milchsäuremolekülen aufgebaut ist und aus Biomasse gewonnen wird. Es stellt derzeit eines der technisch wichtigsten Biopolymere am Markt dar. Im Vergleich zu CP ist es zu 100% biobasiert. Bezüglich der Verarbeitung der Polymere CP und PLA im Schaumprozess besteht am Fraunhofer ICT bereits ein großer Erfahrungsschatz, weshalb diese Materialtypen unter anderem für erste Versuche ausgewählt wurden. Die Type Arboblend (PLA-basierter Blend) wurde vom Projektpartner Tecnar aufgrund seiner möglichen Eignung im Projekt empfohlen.

Mit fortschreitender Erfahrung und Erkenntnisgewinn im Projekt, sowie auf Basis der bis dahin erzielten Ergebnisse wurden weiterhin Polybutyratadipat-Terephthalat (PBAT) und Polybutylensuccinat (PBS) ausgewählt und auf ihre Eignung hinsichtlich Schäumbarkeit untersucht. PBAT ist ein biologisch abbaubarer Polyester mit fossilem Ursprung. PBS ist ebenfalls biologisch abbaubar, allerdings auf Basis nachwachsender Ausgangsstoffe (Bernsteinsäure und 1,4-Butandiol) hergestellt. Die beiden Polymere wurden aufgrund ihrer Materialeigenschaft des biologischen Abbaus, sowie ihrer für das Schäumen günstigen rheologischen Eigenschaften (vergleichbar zu LD-PE) ausgewählt. Des Weiteren sind diese Polymere auf dem Markt derzeit noch nicht etabliert und boten damit ein großes Innovationspotential im Projekt.

Thermoplastische Stärke (TPS) wurde ebenfalls mit ausgewählt, aufgrund der schlechten Verarbeitbarkeit (Materialabbau durch Feuchtigkeit) jedoch nicht weiterverfolgt.

### 3.2.1.3 Compoundierung

*(TECNARO GmbH)*

Ziel war zunächst die Entwicklung eines Composites, bei dem das Basispolymer Cellidor CP 400-10 mit möglichst hohem Fasergehalt versehen wird. Die Verwendung der reinen Cellulosefaser Tencel FCP 10/300 scheiterte zunächst aufgrund deren geringer Rieselfähigkeit. Deswegen kam zunächst die Faser ARBOCEL C320 (Rettenmaier) zum Einsatz, welche allerdings noch einen Restligningehalt aufweist. Der Gehalt an Faser im Polymer betrug 40%. Um ein gleichwertiges Polymer auf Basis Tencel FCP 10/300 herzustellen, musste die Compoundierung optimiert werden. Dies gelang durch eine geeignete Wahl der Verfahrensoperationen Fördern, Aufschmelzen, Dispergieren, Mischen, Entgasen, Druckaufbau und Extrusion (Ausstoßen). Bei der Compoundierung spielen sowohl die Vorbehandlung als auch die Schneckengeometrie sowie Drehzahlen und Temperaturprofile im Doppelschneckenextruder eine entscheidende Rolle.

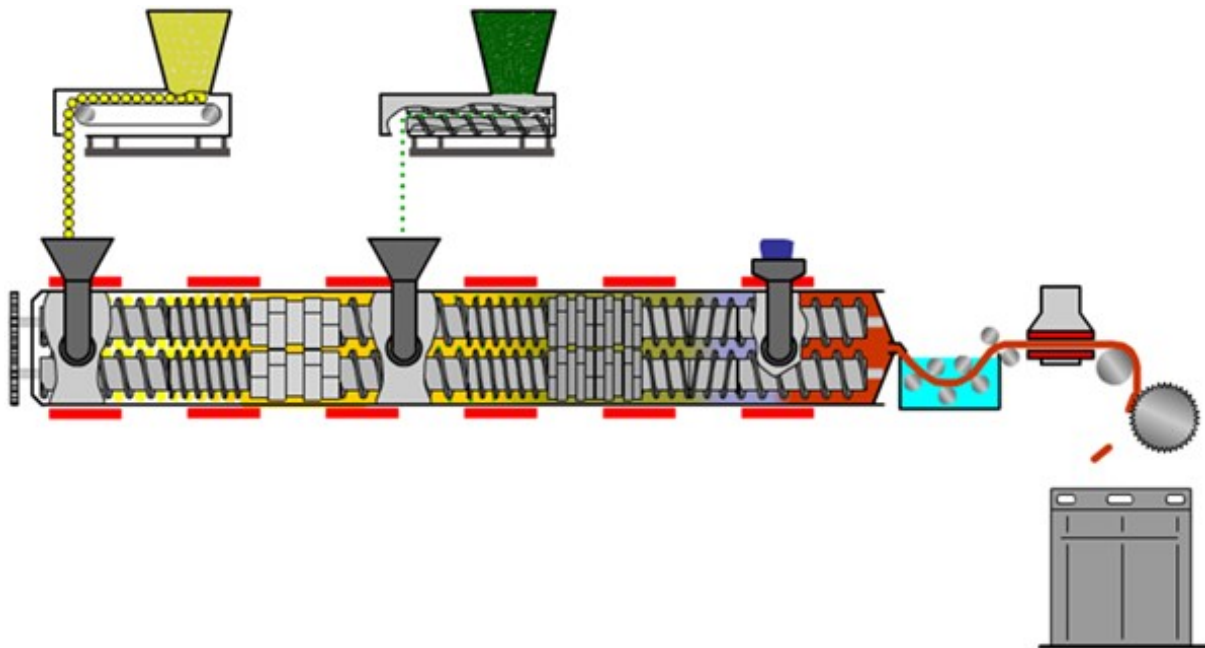


Abbildung 2: Schema der Compoundierung

Folgende Parameter sind für den Einsatz in der Compoundierung erforderlich:

- Fester Zustand
- Temperaturstabilität ( $> 210\text{ °C}$ )
- Feuchtigkeitsgehalt  $< 7\%$
- Schüttgewicht  $> 250\text{g/l}$  (nicht gepresst, nicht gestampft)
- Gute Rieselfähigkeit
- Geruchsfrei

Fasern:

- Säurefrei (z.B. Essigsäure)
- Hohes Aspekt-Verhältnis (z. B. Durchmesser  $10\text{ }\mu\text{m}$ , Länge  $200\text{ }\mu\text{m}$ )

Die Parameter müssen bei den unterschiedlichen Rohstoffen variiert und individuell angepasst werden. Verschiedene Compounds wurden hergestellt. Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen sind in der unten angeführten Tabelle dargestellt.

Als nachteilig erwies sich die geringe Rieselfähigkeit der beigestellten Faser Tencel FCP 10/300. Dennoch gelang auch hier die Herstellung von geringen Mengen eines Compounds mit 40%igem Fasergehalt, welches in den mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu dem Werkstoff auf Basis ARBOCEL C320-Fasern geringere Werte aufweist. Insgesamt musste die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Verwendung von Tencel FCP 10/300 unter industriellen Bedingungen nur unter erschwerten Bedingungen möglich ist.

Im weiteren Verlauf der Projektbearbeitung wurde die Verwendung weiterer Biopolymere beschlossen. Neben Polymilchsäure (PLA), kamen Polybutyratadipat-Terephthalat (PBAT) und Polybutylensuccinat (PBS), welche mit 30% Tencel-Faser geblendet wurden, zum Einsatz. Die

hergestellten Werkstoffe wurden dem Fraunhofer ICT zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung gestellt. Als weniger geeignet erwiesen sich hierbei Werkstoffe auf Basis thermoplastischer Stärke. Zum Ende der Versuchsreihe kam auch noch ein Cellulosepropionat zum Einsatz, welches mit einem Pulver aus Cellulosefasern (HM90 von Jelu) geblendet wurde. Die geeigneten Materialien wurden im Labor von Tecnaro charakterisiert, wobei der MVR-Wert (melt volume rate) sowie die mechanischen Kennwerte ermittelt wurden. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle aufgelistet:

Tabelle 3: Mechanische Kennwerte der untersuchten Materialien

	PLA	PLA 30% Tencel	PBAT	PBAT 30% Tencel	PBS	PBS 30% Tence l	Cellu- lose- propio- nat  50% HM90 (Jelu)	Cellu- lose- propio- nat  40% C320 (Rett)	Cellu- lose- propio- nat  40% FCP (Tencel )	PBS  50% HM90 (Jelu)
<b>MVR 190°C 2,16 kg [cm<sup>3</sup>/10 min]</b>	3,21	3,62 5kg	2,43	3,14 5kg	6,42	7,63 220°C 5kg	3,48 220°C 5kg	1,26 210°C 5kg	4,90 240°C 5kg	Nicht mess- bar
<b>E-Modul [MPa]</b>	3.600	7.100	50	510	700	2.600	2.700	5.100	3.800	3.600
<b>Höchst- zugkraft [MPa]</b>	69	57	12	10	42	38	37	48	39	39
<b>Höchst- zug- dehnung [%]</b>	2	1	491	14	16	3	2	1	2	2
<b>Schlag- zähigkeit [kJ/m<sup>2</sup>]</b>	21	10	NB	NB	161	7	18	9	18	13
<b>Wärme- form- stabilität [°C] Vicat A</b>	62	79	70	86	111	122	118	127	123	113

Die Schäumprozesse an den entwickelten Werkstoffen wurden am Fraunhofer ICT durchgeführt.

## 3.2.2 Materialentwicklung Route 2

### 3.2.2.1 Cellulose

*(DHBW Karlsruhe)*

Zu Beginn des Projektes wurden verschiedene Zellstoffe getestet. Darunter waren Kurzfasern und Langfasern.

Zunächst wurden in Vorversuchen geeignete Fasern und ein geeigneter Aufbau der Halbzeuge identifiziert. Zu berücksichtigen war die Tatsache, dass Fasern aus Cellulose eine geringe Dehnbarkeit aufweisen und unter Zugbelastung schon bei geringer Verformung reißen. Das Reißverhalten von Celluloseprodukten ist abhängig von der Faser (Faserart, Faserlänge, ...) und vom Verarbeitungsprozess. Ein Ansatz war daher, dass man ein Fasergefüge herstellt, in dem die Fasern aneinander abgleiten können. Dazu ist ein lockeres Gefüge notwendig, in dem die Fasern mit wenig Kontaktstellen aneinander liegen. Ein weiterer Aspekt, der bei der Faserauswahl berücksichtigt wurde, ist, dass eventuelle Risse beim Umformen nicht zu einer Rissausbreitung führen.

Als geeignet erwiesen sich ungekürzte Fasern aus Nadelhölzern heraus (ungemahlene Langfaser) und eine Papierherstellung ohne Pressvorgang mit schonender Trocknung ohne Druck.

Vorzugsweise sollte der lockere Aufbau dazu führen, dass bei Krafteinwirkung und der daraus resultierenden Dehnung das Halbzeug gleichmäßig gedehnt wird und damit mehrere kleine/dünne Risse an verschiedenen Stellen entstehen, die in ihrer Rissöffnung im Einzelnen weniger ausgeprägt sind. Beim Übereinanderlegen mehrerer Lagen sollte es möglich sein eine geschlossene Form zu erhalten, da die Rissbildung an unterschiedlichen Stellen stattfindet.

Die Vorversuche zeigten ferner, dass sich eine gewisse Feuchtigkeit im Halbzeug als vorteilhaft auswirkte und das Halbzeug dadurch dehnfähiger wurde. Durch die Feuchtigkeit werden die Wasserstoffbrücken-Bindungen, die im trockenen Zustand zu sehr festen und eher spröden Materialien führen, aufgebrochen und ein Abgleiten der Fasern aneinander erleichtert.

Mit Hilfe von Additiven soll das Halbzeug so modifiziert werden, dass die Fasern zusätzlich noch leichter aneinander abgleiten können.

Der verwendete Langfaser-Zellstoff entstammt der ZELLSTOFF STENDAL GMBH und es handelt sich um den Mercer Stendal TCF Nothern Bleached Softwood Kraftpulp (dt. nördlicher gebleichter Langfasersulfatzellstoff (NBSK)). Die mechanischen Eigenschaften sind abhängig vom Mahlgrad. Dabei definiert sich der Zellstoff mit einer Dichte von 559 kg/m<sup>3</sup> bei einem Entwässerungskennwert nach SchopperRiegler von 12. Darüber hinaus zeichnet er sich durch einen Zugfestigkeitsindex von 25,1 kNm/kg und einer Dehnung von 2,5 % nach DIN ISO 1924-3 aus. Der pH-Wert wird mit 5,1 angegeben und der Aschegehalt beläuft sich auf 0,22 %, währenddessen der Anteil an Extraktstoffen unterhalb von 0,1 % liegt. Die Faserlänge wird mit 2,23 mm und die Faserbreite mit 28,6  $\mu\text{m}$  angegeben. Er besteht zu 40 bis 70 % aus Kiefernfasern und zu 30 bis 60 % aus Fichtenfasern.

---

Der Zellstoff lag in Form von gepressten Platten vor, der auch für Demonstratorbauteile verwendet wurde.

### **3.2.3 Materialentwicklung Route 3**

#### 3.2.3.1 Cellulose

*(DHBW Karlsruhe)* - Die Ergebnisse hierzu sind in Kapitel 3.2.2.1 enthalten.

#### 3.2.3.2 Polymere

*(Fraunhofer ICT)*

Zur Prozessvalidierung und Kostenminimierung wurde sich zunächst auf ein Material, amorphes PLA, beschränkt. Dieses hatte sich in den Autoklavschäumversuchen als ein vielversprechendes Material zur späteren Aufschäumung erwiesen.

### **3.2.4 Materialentwicklung Route 4**

#### 3.2.4.1 Cellulose

*(DHBW Karlsruhe)* - Die Ergebnisse hierzu sind in Kapitel 3.2.2.1 enthalten.

#### 3.2.4.2 Lignin

*(TECNARO GmbH)*

Von Tecnaro wurden die beiden Lignine 3363 und 3DTC1 zur Verfügung gestellt. Lignin 3363 ist ein hochreines, nicht sulfoniertes Rohkraftlignin. Dieses Produkt ist hochfunktionalisiert an Carbonsäure, aliphatischen und aromatischen Hydroxylgruppen und frei von reduzierenden Zuckern. Lignin 3DTC1 ist ein relativ neu entwickeltes Organosolv-Lignin, welches in einer industriellen Bioraffinerie entwickelt wurde. Es zeichnet sich durch eine gute Verarbeitbarkeit in der Compoundierung sowie durch einen angenehmen Geruch aus.

#### 3.2.4.3 Zellstoff / Cellulose

*(DHBW Karlsruhe)* - Die Ergebnisse hierzu sind in Kapitel 3.2.2.1 enthalten.

#### 3.2.4.4 Gelatine

*(DHBW Karlsruhe)*

Gelatine ist ein Oberbegriff für eine Gruppe an Proteinen. Schon im Mittelalter wurde Gelatine in der Papierindustrie eingesetzt, als Beschichtung zur Teilhydrophobierung und damit zur besseren Bedruckbarkeit.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> (Hunter, 1978)

Außerdem befassen sich neuere Untersuchungen damit, Gelatine zur Verbesserung der Thermofombarkeit von Papier zu verwenden.<sup>4</sup>

Für die Gelatine wurden zwei Typen von Gelatine der GELITA AG Deutschland verwendet. Diese unterscheiden sich in ihrer Gallertfestigkeit und damit auch in ihrer Viskosität.

Tabelle 4: Übersicht eingesetzte Gelatine-Typen

	Typ	Gallertfestigkeit	Viskosität (6,66% Lösung, 60°C)	pH-Wert	Aschegehalt (nach 4h bei 800°C)	Feuchte (nach 16h bei 105°C)
Gelatine A	Gelita Image SI	285 Bloom	4,57 mPas	5,07	<0,10%	10,4%
Gelatine B	Gelita Image LB	122 Bloom	5,45mPas	5,5	0,41%	11%

### 3.2.4.5 Polyvinylalkohol / PVOH

(DHBW Karlsruhe)

Polyvinylalkohol ist ein thermoplastischer, biologisch abbaubarer Kunststoff, der petrochemisch hergestellt wird. Durch seine chemische Struktur mit vielen Hydroxylgruppen hat PVOH stark hydrophile Eigenschaften.<sup>5</sup>

Es gibt hoch hydrolysierte Typen (Hydrolysegrad > 91%) und teilweise hydrolysierte Typen (87 – 98% Hydrolysegrad). Teilweise hydrolysierte Typen besitzen mehr Acetatgruppen, und besitzen dadurch eine niedrigere Kristallinität, einen geringeren Schmelzpunkt, eine höhere Elastizität und eine bessere Löslichkeit in Wasser.

Anwendungsgebiete finden sich in der Textilindustrie, Papier- und Klebstoffindustrie.

In der Papierindustrie wird PVOH als Trockenfestmittel oder Klebstoff für Bücher verwendet. (60) Damit handelt es sich um ein Additiv, welches derzeit schon in der Papierindustrie verwendet wird und damit schon dort bekannt ist.

Verwendet wird PVOH, da vermutet wird, dass PVOH Wasserstoffbrückenbindungen und Acetatbindungen mit Cellulose eingeht.<sup>6</sup>

Der Polyvinylalkohol wurde über die Kuraray Europe GmbH bezogen. Zur Analyse der möglichen Typen wurden Typen mit gleichem Hydrolysegrad und unterschiedlicher Kettenlänge gewählt.

Tabelle 5: Übersicht über eingesetzte PVOH-Typen

	Typ	Hydrolysegrad (in%)	Viskosität (4% Lösung) (in mPas)	pH-Wert	Aschegehalt (in%)
PVOH A	20-98	98,2	5,5	5,5	0,02

<sup>4</sup> (Khakalo u.a., 2014)

<sup>5</sup> (Stevens, 2002)

<sup>6</sup> (Millon, Oates, & Wan, 2009)

PVOH B	6-98	98,6	5,5	5,5	0,17
PVOH C	18-88	87,5	18,2	5,5	0,22
PVOH D	6-88 (6-88 S2)	88	5,1	5,5	0,33
PVOH E	22-88 S2	88	20,5-24,5	5,0 – 7,0	≤ 0,5
PVOH F	28-99 S1 (noch feiner)	99,0 – 99,8	26,0-30,0	4,5 – 7,0	≤ 0,5
PVOH G	AQ 4104	98,0 – 99,0	3,6 – 4,4	4,0 – 7,0	≤ 0,1
PVOH H	RS 2117	97,5 – 99,0	25,0 – 30,0	5,0 – 7,0	≤ 0,4

### 3.2.4.6 Chitosan

(DHBW Karlsruhe)

Neben der Cellulose ist Chitin ein weiteres Biopolymer, dass weltweit theoretisch mit über  $10^{13}$ kg in verschiedensten Formen (Insektenpanzer, Pilzen, Krustentierschalen, Bakterien etc.) zur Verfügung steht. Chitin besitzt gegenüber endlichen Ressourcen den entscheidenden Vorteil, dass es in der Natur „nachwachsen“ kann. Dabei kommt das Polysaccharid unter anderem in großen Mengen in den Schalen von Krustentieren, sowie in Pilzen und Bakterien vor.<sup>7</sup>

Während Chitin in wässrigem Milieu nicht löslich ist, lässt sich Chitosan mittels leicht saurer Umgebung in Wasser lösen. Dabei schwanken die Angaben von einem nötigen Grad an Deacetylierung zwischen 50 und 60 %. Ebenfalls wird ein pH-Wert von unter 6,5 durch organische Säuren wie Ameisensäure, Essigsäure, Weinsäure oder Zitronensäure zum Lösen benötigt.<sup>8</sup> Das Chitosan wurde über die BioLog Heppe GmbH bezogen. Es handelt sich um folgende Typen:

Tabelle 6: Übersicht über eingesetzte Chitosan-Typen

	Typ	Deacetylisierungsgrad (in%)	Viskosität (1% Lösung, 1% Essigsäure) (in mPas)	Aschegehalt
Chitosan A	90/10/A1	90	10	>1%
Chitosan B	90/100/A1	90	100	>1%
Chitosan C	75/200/A3	75	200	3%

## 3.3 Prozessvalidierung, Thermoform-Halbzeuge (AP 2)

Tabelle 7: Übersicht verschiedene Projektrouten

Route 1	Route 2	Route 3	Route 4
---------	---------	---------	---------

<sup>7</sup> (Tharanathan & Kittur, 2003)

<sup>8</sup> (Habibie S, 2016)

Fasern im Schäumprozess	Geschäumte Polymere im Papierhalbzeug	Fasern aus Polymeren im Papier	Additivierung von Papierhalbzeugen
Compoundierung	Beladen von Mikrobeads mit Treibmittel und Mahlen	Spinnen von Fasern aus einem Polymer	Einsatz verschiedener Additive
Schäumprozess	Papierherstellung	Papierherstellung	Papierherstellung

### 3.3.1 Halbzeugherstellung Route 1

#### 3.3.1.1 Strangschäumen

*(Fraunhofer ICT)*

Der von Tecnaro hergestellte Masterbatch (CP mit 40% Cellulosefasern) wurde am Fraunhofer ICT hinsichtlich seiner Schäumbarkeit untersucht. Das Material wurde dazu im ersten Schritt bei 75° C für mind. 3 Stunden getrocknet. Anschließend wurde es auf einer Extrusionslinie (siehe Abbildung 3) aufgeschmolzen, mit Treibmittel (CO<sub>2</sub>) versetzt, homogenisiert und durch eine Schmelzepumpe mit anschließend temperierter Düse (Durchmesser 4,2 mm) in die Atmosphäre gefördert. Durch den Druckabfall von eingestellten 80 bar im Extruder zu Atmosphärendruck erfolgte ein Aufschäumen des Polymer-Faser-Stranges. Zur besseren Bewertung wurde der Versuch mit 100% CP gestartet und stufenweise Faser-Masterbatch hinzudosiert.



Abbildung 3: Extrusionslinie Strangschäumen, Leistritz Micro 27mm 40L/D

In Abbildung 4 ist das Ergebnis der Faserschaumversuche dargestellt. Die Dosierung von 40 Gew.-% Cellulosefaser in CP führte zum Zusammenfallen des Schaumstranges und zum Prozessabbruch wegen zu hohem Druck an der Austrittsdüse. Dies kann auf eine Ansammlung von Fasern zurückgeführt werden.



Abbildung 4: geschäumte Polymerstränge aus CP 400-10 mit 0%, 4%, 10%, 20%, 40% Fasergehalt (von links nach rechts)


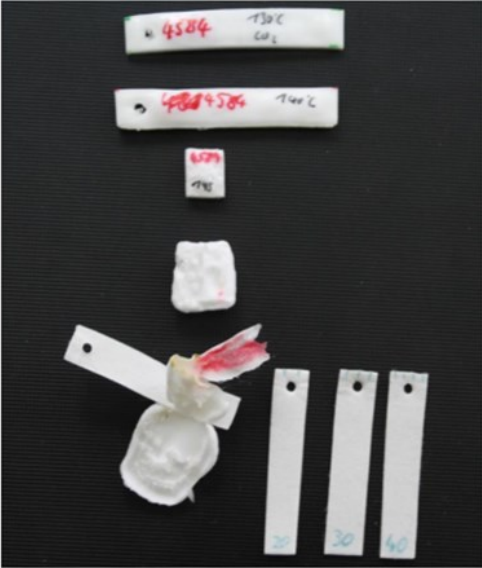
Das Zusammenfallen des Schaumes lässt sich auf die veränderte Schmelzefestigkeit und Schmelzeelastizität des CP-Faser-Compounds zurückführen. Diese wurden anhand von einer Rheotensmessung ermittelt (siehe Kapitel 3.8.1.2 Kunststoffcharakterisierung) und in Abbildung 62 graphisch dargestellt. Es ist eine deutliche Festigkeitserhöhung und ein Verlust an Elastizität der Compounds im Vergleich zur Nullprobe erkennbar. Das heißt, dass der Strang nach Austritt aus der Extrusionsdüse früher durch das sich ausdehnende Treibgas aufreißt und das Gas austritt. Dies führt zu einem Zusammenfallen des Stranges.



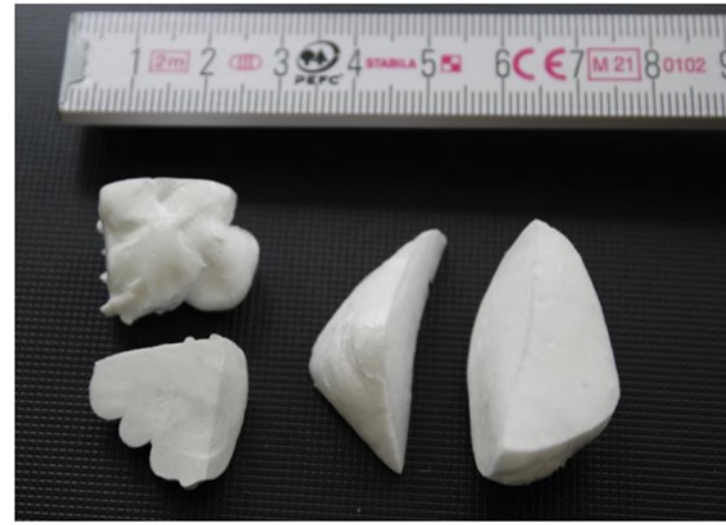
Um den Faseranteil im Polymerschaum, bei gleichzeitig gegebener Prozessstabilität, zu erhöhen (> 40 %) wurde von diesem Prozessweg abgesehen und weitere Möglichkeiten zur Fasereinkbringung im Polymerprozess evaluiert. Dabei wurde der Prozessweg des Autoklavschaumes ausgewählt, da aufgrund des Verfahrens Compounds mit hohen Fasergehalten potentiell geschäumt werden können und durch die geringe Probengröße viele Treibmittel/Polymerkombinationen untersucht werden können.




### 3.3.1.2 Autoklavschaumen (Fraunhofer ICT)

Für den Autoklavschaumprozess wurden reine Biopolymer und Biopolymer-Faser-Compounds (bereitgestellt durch TECNARO) am Fraunhofer ICT mittels Spritzguss zu Platten geformt und diese in einem Autoklav unter hohem Druck mit Treibmittel beaufschlagt. Der Druck wurde nach einer definierten Zeit schlagartig entlassen, wodurch eine Expansion des Polymers (Schaumbildung) erfolgte.

Die Biopolymer und Biopolymer-Faser-Compounds wurden zunächst charakterisiert (TGA, DSC, siehe Kapitel 3.8.1.2) und anschließend auf ihr Schäumverhalten hin untersucht. Dabei wurden Treibmittelart, Beladungstemperatur, Beladungszeit und Beladungsdruck variiert. Die besten Schaumergebnisse hinsichtlich ihrer Dichte sind im Folgenden aufgeführt:

<p>Amorphes PLA</p> 	<p>Treibmittel:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stickstoff → keine Zellen</li> <li>• Isobutan → keine Zellen</li> <li>• CO<sub>2</sub> → 55g/l → langzeitstabiler Schaum</li> </ul>
<p>Teilkristallines PLA</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub> geringfügig löslich</li> <li>• Große Blasenbildung → Dichte: 179 g/l</li> <li>• Sehr sprödes Material</li> </ul>
<p>PHBH</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Große einzelne Blasen</li> <li>• Schlechte Treibmittellöslichkeit</li> <li>• Hohe Dichten</li> </ul>

		
<p>PBAT</p> 		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufschäumung durch Isobutan im Autoklav möglich</li> <li>• Geringfügiges Nachschäumen durch IR- Bestrahlung möglich</li> <li>• Dichte: 180 g/l</li> </ul>
<p>PBS</p> 		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr gut aufschäumbar und versinterbar mit CO<sub>2</sub></li> <li>• Langzeitstabiler Schaum</li> <li>• Andere Treibmittel (Isobutan, Stickstoff) nicht zielführend</li> </ul>
<p>PBAT-Faserkomposit (30% Tencel)</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr gute CO<sub>2</sub>-Löslichkeit und Expansion → Dichte: 50g/l</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schaum instabil, fällt nach 24 Std. zusammen → Dichte: 192 g/l</li> <li>• Große Blasen im Faserkomposit</li> <li>• Einfluss Fasermodifikation?</li> </ul>
<p>PBS-Faserkomposit (30% CTMP-Fasern)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufschäumung möglich</li> <li>• Dichte: 370 g/l</li> </ul>
<p>CP-Faserkomposit (40% ARBOCEL C320)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Treibmittel CO<sub>2</sub></li> <li>• 0% Fasern: 145 g/l</li> <li>• 20% Fasern: 240 g/l</li> <li>• 40% Fasern: 363 g/l</li> <li>• Große Blasen im Faserkomposit (ähnlich wie bei PHBH)</li> </ul>

Zusammengefasst sind die Ergebnisse in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Aussichtsreiche Biopolymere und Biopolymer-Faser-Compounds sind grün markiert.

Tabelle 8: Zusammenfassung Autoklavschäumversuche

Polymer	Charakteristika	Dichte
Amorphes PLA	Langzeitstabil	50 g/l
Teilkristallines PLA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringfügige Aufschäumung</li> <li>• Bildung großer Blasen</li> </ul>	719 g/l
PHBH	Nur einzelne große Blasen	---
PBAT	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute Aufschäumung mit CO<sub>2</sub></li> <li>• Nicht langzeitstabil</li> </ul>	192 g/l (zusammengefallen)
PBS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute Aufschäumung</li> <li>• Langzeitstabil</li> </ul>	145 g/l
CP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mit Fasern inhomogene Aufschäumung</li> <li>• Bildung großer Blasen</li> </ul>	145-363 g/l

### 3.3.1.3 Schaumfolienherstellung

(Fraunhofer ICT)

Für die Herstellung von Demonstratoren im Thermoformprozess wurden auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus dem Autoklavschäumen Schaumfolien mittels einer Tandemextrusionsanlage (siehe Abbildung 5) hergestellt.



Abbildung 5: Schaumtandex-Labor Extrusionsline ZE 30/KE 60, KraussMaffei Berstorff

Dabei wird ein Polymer in einem Zweischncken-Extruder aufgeschmolzen, mit Treibmitteln (Mehrfachdosierung möglich) versetzt und homogenisiert. Anschließend wird das Polymer-Gas-Gemisch unter Druck auf einem Einschncken-Extruder zu einer Austrittsdüse transportiert und dabei auf eine definierte Temperatur abgekühlt. Für die Folienherstellung wird eine Ringdüse verwendet, die es ermöglicht einen Schlauch herzustellen. Dieser wird unmittelbar nach der Düse auf einen Dorn gezogen, welcher den Schlauch in eine Folie aufschneidet, abkühlt, stabilisiert und kalibriert. Durch den schlagartigen Druckabfall an der Düse auf Atmosphärendruck expandiert das Treibmittel und das Polymer schäumt auf.

Für diesen Prozess wurden die Polymere CP und PLA ausgesucht, da sowohl Prozess Erfahrung damit bestand, als auch die Mengenverfügbarkeit gegeben war.

Die Verarbeitung von CP mit Cellulosefasern verlief erfolgreich. Der zur Verfügung gestellte Compound hatte einen Fasergehalt von 50% Jelu HM90. Im Extrusionsprozess wurde mit reinem CP gestartet und der Faseranteil schrittweise erhöht. Es konnten mit einer stabilen Prozessführung max. Fasergehalte von 20% realisiert werden (siehe Abbildung 6).

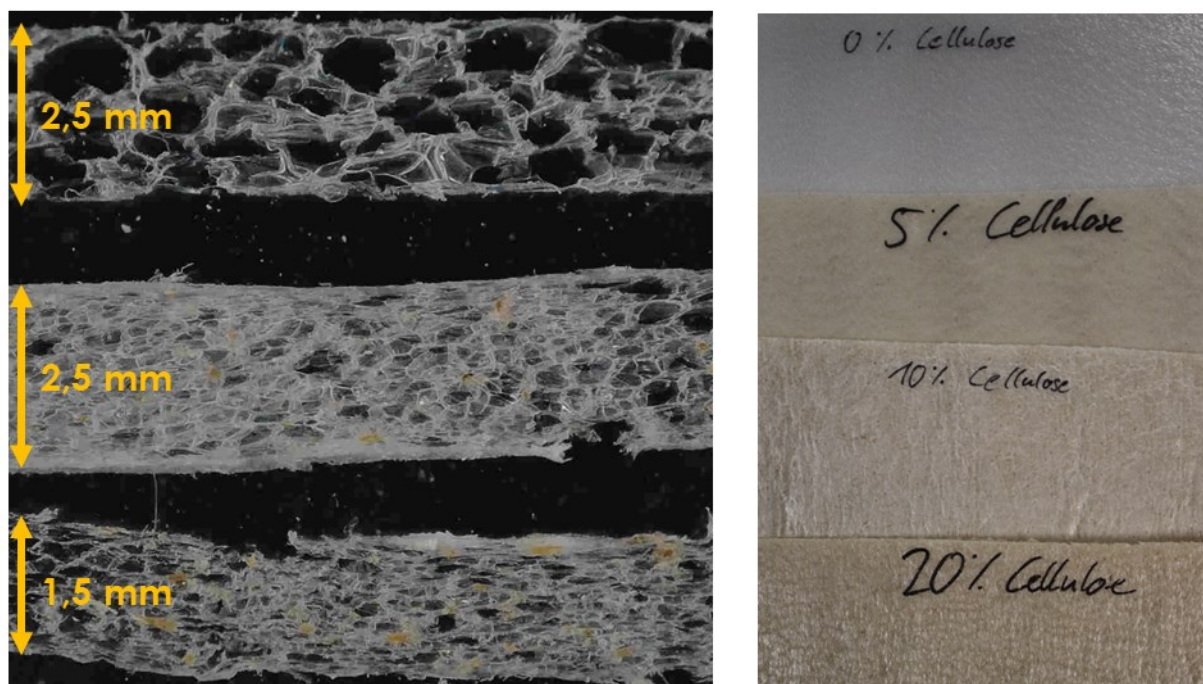


Abbildung 6: links: CP-Schaumfolie mit 0 / 10 / 20 % Cellulose Jelu HM90 (von oben nach unten), rechts: CP-Schaumfolie 0-20 % Cellulose Jelu HM90

Die Dichteverteilung liegt dabei wie folgt:

CP [wt%]	Cellulose [wt%]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Foliendicke [mm]
100	0	102	2,6
95	5	83	2,5
90	10	79	3,0
85	15	87	2,0
80	20	104	1,5
80	20	98	1,6

Die CP-Faserschaumfolie liegt damit in einem vergleichbar niedrigen Dichtebereich von ca. 80 -100 kg/m<sup>3</sup>. Je höher die Celluloseanteile steigen, desto dünner wird die Folie.

Die Verarbeitung von PLA zu Schaumfolie verlief nicht erfolgreich. Das reine PLA ließ sich nicht verarbeiten aufgrund von zu geringer Schmelzfestigkeit. Der Einsatz von Kettenverlängerer verbesserter die Verarbeitbarkeit und erhöhte die Schmelzfestigkeit, jedoch war das Material sehr spröde, erstarrte nach Düsenaustritt schnell und ließ sich nicht über den Kalibrierungsdorn ziehen (siehe Abbildung 7).

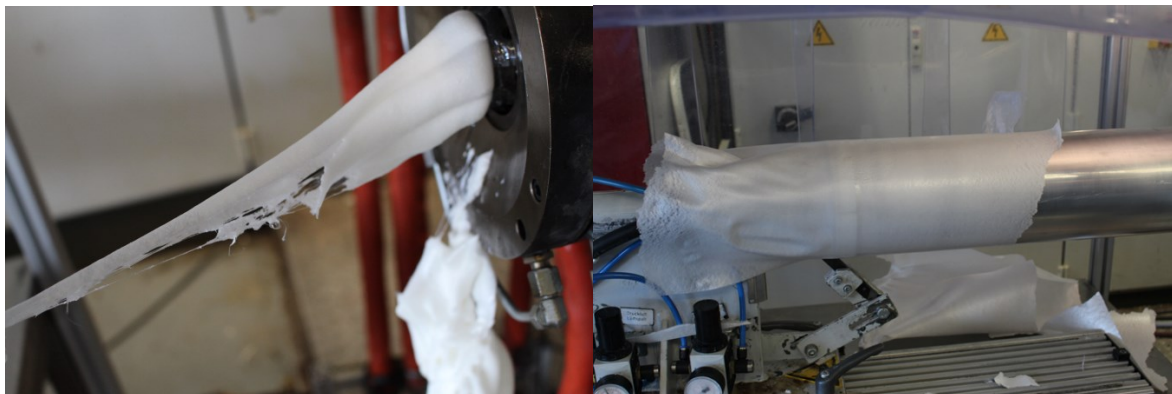


Abbildung 7: links: PLA ohne Kettenverlängerer, rechts: PLA mit Kettenverlängerer

Eine Variation des Treibmittels, der Temperatur im Extruder und an der Düse, als auch des Kettenverlängerergehaltes brachten keine signifikanten Verbesserungen.

Die Zudosierung des Cellulosemasterbatches zeigte kaum Auswirkungen auf das Material. Die schlechte Verarbeitbarkeit ist nicht in erster Linie auf die Cellulose zurück zu führen, sondern auf die verwendete PLA-Type.



Abbildung 8: PLA-Schaumfolie mit 10% Cellulose-MB (Gehalt 50% Jelu HM90)

### 3.3.2 Halbzeugherstellung Route 2

#### 3.3.2.1 Herstellung Mikrobeads

(Fraunhofer ICT)

Zur Untersuchung der Prozessroute 2 wurden am Fraunhofer ICT gasbeladene (Treibmittel) Polymerbeads aus den in AP 1.1 ausgewählten Biopolymeren hergestellt. Dazu wurde eine Partikelschaumextrusionslinie (siehe Abbildung 9) verwendet. Die Polymere wurden jeweils aufgeschmolzen und im Doppelschneckenextruder mit Treibmittel versetzt. Anschließend wurde die gasbeladene Schmelze durch eine Lochplatte in eine Unterwassergranulierung gefördert und dort unter Druck granuliert und mittels Zentrifugaltrockner aufgefangen.



Abbildung 9: Partikelschaumanlage, Leistriz 27 iMaxx 48 L/D

Die so hergestellten Polymerbeads (siehe Abbildung 10) wurden gasdicht verschlossen und an das Papierzentrum Gernsbach zur Weiterverarbeitung geschickt.

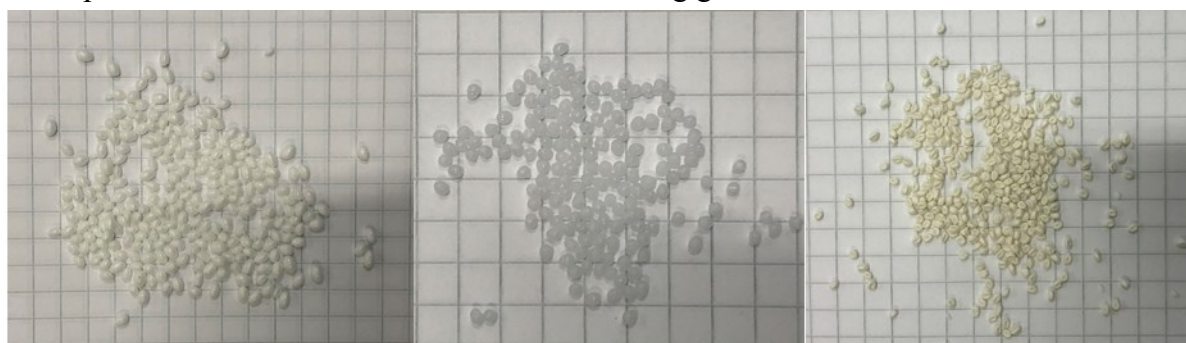


Abbildung 10: gasbeladene Polymerbeads, PLA, CP, Arboblend (von links nach rechts)

Die Polymerbeads wiesen dabei folgende Partikelgrößenverteilung auf:

Material:	Partikelgröße [mm]
PLA	1,5-3,2
CP	1,5-1,7
Arboblend	1,4-2,0

### 3.3.2.2 Einbringen Mikrobeads Papier

*(DHBW Karlsruhe)*

Grundgedanke war, dass mit einem Treibmittel beladene Mikrobeads im Faserbund beim Aufschäumen den Faserverbund des Papiers auflockern und während oder nach dem Aufschäumen eine Umformung möglich sei.

Dazu wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt, drei Typen Mikrobeads (PLA, CP und Arboblend) in Papier einzubringen.

- a) Rapid-Köthen: Am Rapid-Köthen konnten keine Blätter mit einheitlicher Verteilung der Mikrobeads hergestellt werden. Die beladenen Mikrobeads waren zum Teil schon leicht expandiert, sodass die Dichte so gering war, dass sie auf dem Wasser im Zylinder aufgeschwommen sind. Auch eine Verkürzung der Ruhezeit brachte keinen Erfolg. Die Fasern, die homogen im Wasser verteilt vorlagen, bildeten beim Absaugen des Wasser-Faser-Gemischs die erste Lage, während die Mikrobeads sich zum Schluss oben auf das Faservlies legten. Dieses Phänomen war bei PLA und bei CP zu sehen.

Die Arboblend-Mikrobeads hatten eine höhere Dichte als Wasser, diese sanken nach unten, noch bevor das Wasser-Faser-Gemisch angesaugt wurde.

In allen drei Fällen lagen die Mikrobeads oberflächlich am Faservlies und waren nicht im Gefüge verteilt. Zudem war zu beobachten, dass auch die Verteilung an der Oberfläche nicht homogen war. Die Mikrobeads, die oben auf geschwommen sind haben sich aneinander angelagert (Wasser hydrophil – Mikrobeads hydrophob).

Aufgrund der Größe der Mikrobeads ist keine Anwendung im industriellen Maßstab an einer Papiermaschine absehbar. Die Mikrobeads sind größer als die Düsen am Stoffauflauf und würden die Maschine verstopfen. Die oben beobachtete Trennung würde auch in der Bütte des Stoffauflaufs auftreten.

- b) Pulp von Hand: Um das Prinzip der Gefügelockerung beim Aufschäumen der Mikrobeads im Papiergefüge dennoch weiterverfolgen zu können, wurde in diesen Versuchen auf maschinelle Hilfe verzichtet. Die Mikrobeads wurden in einen konzentrierten Pulp (Feststoffgehalt ca 90%) eingearbeitet und von Hand vermischt. Der Anteil an Wasser war damit zu gering, um eine Trennung der Fasern und der Mikrobeads zu verhindern. Aus dem Pulp wurden von Hand dicke Faservliese hergestellt. Die Trocknung fand bei sehr moderaten Temperaturen, weit unter der Temperatur statt, um ein vorzeitiges Aufschäumen der Mikrobeads zu verhindern. Damit verlängerte sich die Trockenzeit erheblich! Ein weiterer Nachteil, der sich bei diesem Verfahren herausstellte ist, dass durch die gewünschte homogene Verteilung der Mikrobeads im Papier deshalb viele Mikrobeads an der Oberfläche des Papiers lagen, die nach dem Trocknen abfielen. Zwischen den Mikrobeads und den Cellulosefasern kann ohne Haftvermittler keine Verbindung entstehen.
- c) Mehrlagiger Aufbau: Bei diesem Verfahren wurden die Mikrobeads zwischen 2 oder 3 Lagen Faservlies eingearbeitet. Die besten Ergebnisse wurden erzielt, wenn die Mikrobeads auf dem frisch hergestellten, noch feuchten (ca 50% Feuchtigkeit) Faservlies

gleichmäßig aufgestreut wurden, eine weitere Lage Faservlies aufgelegt wurde (bei 3-lagig eine weitere Schicht Mikrobeads und eine weitere Schicht Faservlies) und dann die Lagen mit Hilfe einer breiten Lackierwalze aus Schaumstoff miteinander vergautsch wurden. Der Raum zwischen den Mikrobeads war bei größerem Anteil an Mikrobeads (20 Gew.-%) nicht ausreichend groß genug, um eine gute Haftung der Lagen zu gewährleisten (hydrophobe Mikrobeads bilden keine Wasserstoffbrücken aus). Die Lagenhaftung konnte mit Kleber (Sprühstärke) verbessert werden. Die Trocknung erfolgte wieder bei moderater Temperatur, um ein vorzeitiges Expandieren der Mikrobeads zu verhindern. Aufgrund der Dicke der Proben und der verringerten Temperatur hat sich die Trockenzeit erheblich verlängert.

### 3.3.3 Halbzeugherstellung Route 3

#### 3.3.3.1 Spinnen von Polymerfasern

*(Fraunhofer ICT)*

Zur besseren Einbringung von Polymeren in die Papiermatrix wurden Polymerfasern gesponnen. Diese sollen sich im Papierherstellungsprozess (Schöpfen) besser in der Cellulosepulpe „verfangen“ und nicht wie die Mikrobeads oder das Polymerpulver auf dem Wasser aufschwimmen.

Im Rahmen eines Unterauftrages wurden vom Fraunhofer IAP folgende Fasergeometrien im Spinnverfahren aus PLA hergestellt:

- Multifilamentgarn mit Filamentdurchmessern von 25  $\mu\text{m}$  sowie 50  $\mu\text{m}$  (je 500 g)
- Monofilamente mit Filamentdurchmessern von 100  $\mu\text{m}$  (500 g)

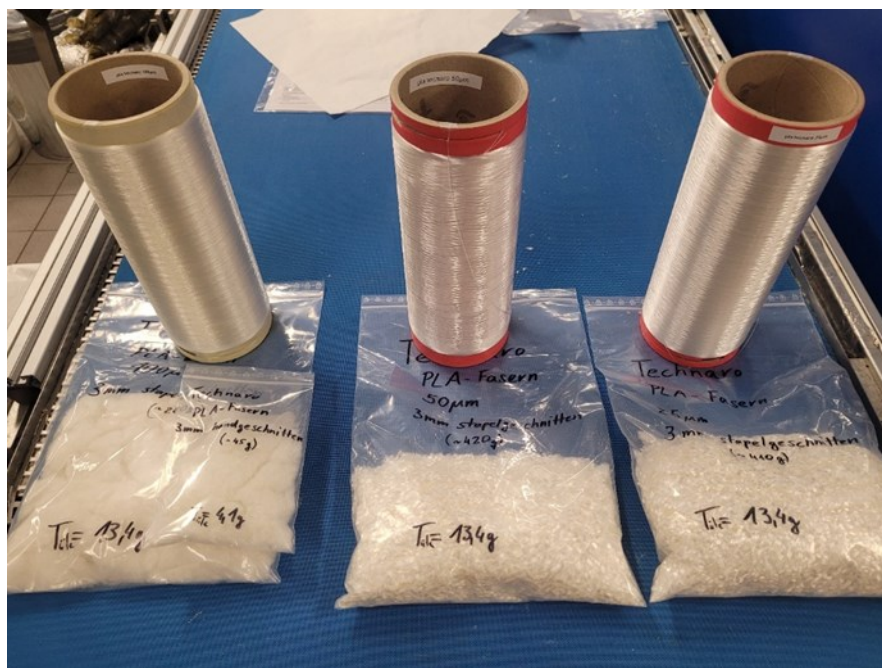


Abbildung 11: PLA Filamente

Der weiterhin angestrebte Filamentdurchmesser von 200  $\mu\text{m}$  konnte verfahrenstechnisch nicht realisiert werden. Die Filamente wurden jeweils auf 3 mm Faserlänge geschnitten und zur Weiterverarbeitung an das Papierzentrum Gernsbach versendet. Weitere Proben wurden an das ICT geschickt, um die Schäumbarkeit der Fasern (ohne Papier) im Autoklavschäumprozess zu untersuchen.

### 3.3.3.2 Einbringen von Polymerfasern Papier

(DHBW Karlsruhe)

Ein erfolgreiches Einbringen von Polymerfasern während des Papierprozesses ist abhängig von der Dimension der Fasern (v.a. die Länge), vom Verhältnis Polymerfaser/Cellulosefaser und der Art der Polymerfaser.

Als erfolgversprechend wurde die PLA-Faser eingestuft. Hier lagen bereits Erfahrungen bezüglich Schäumbarkeit und Umformbarkeit (als Platten) vor.

Die Herstellung der Fasern wurde extern in Auftrag gegeben. Die Dimensionen richteten sich nach den Erfahrungen aus vorherigen Versuchen. Es stellte sich heraus, dass zu lange Polymerfasern durch Verwirbelungen Flocken bilden die verknotten können und sich nicht mehr lösen. Eine gleichmäßige Verteilung im Papiergefüge ist damit nicht gewährleistet. Die beste Verteilung im Gefüge erhält man, wenn die Polymerfasern eine ähnliche Länge aufweisen, wie die Cellulosefaser. Die extern hergestellten PLA-Fasern wurden deshalb mit 3mm Länge geordert.

Die Halbzeugherstellung fand am Blattbildner Rapid-Köthen statt, die Trocknung ohne Druck am SUMET-Trochner. Gesintert wurde am POLYSTAT 200 zwei Minuten, bei 135  $^{\circ}\text{C}$  und 50

bar. Die Fasern erschienen bei Durchsicht des Halbzeugs nach dem Sintern deutlich miteinander verschmolzen. 100g/m<sup>2</sup> Papiere wurden mit NBSK und den jeweiligen PLA-Fasern hergestellt, siehe folgende Tabelle. Insgesamt gab es damit 24 verschiedene Kombinationen.

Fasern	Faserdicke (in $\mu\text{m}$ )	Gehalt an PLA-Fasern (in %)	Weiterbehandlung
NBSK	100, 50, 25	60, 40, 20, 10	Gesintert, nicht gesintert

Tabelle 9: Übersicht der verschiedenen Proben und deren Kombinationen

Gehalte von mehr als 60% PLA-Fasern waren nicht herstellbar, da der hydrophobe Anteil im Gefüge zu groß wurde und somit zwischen den Cellulosefasern nicht genügend Wasserstoffbrückenbindungen ausgebildet werden konnten, um ein stabiles Gefüge zu erzeugen. Die Blätter fielen nach dem Trocknen einfach auseinander.

### 3.3.3.3 Autoklavschäumen von Polymerfasern Papier

*(Fraunhofer ICT)*

Die PLA-Faser-Papiere wurden mit allen Faser-Gehalten im Autoklavschäumprozess untersucht. Die Parameter wurden nach Erfahrungswerten von PLA ausgewählt, jedoch konnte kein Aufschäumen beobachtet werden. Das Papier vergilbte lediglich während des Prozesses.

Dies ist wahrscheinlich auf die hohe Kristallinität des PLA aufgrund der Verstreckung im Spinnprozess zurück zu führen. Weiterhin schirmt die Cellulose und das darin enthaltene Wasser die PLA-Faser ab, sodass auch kein nachträgliches Aufschäumen eines mit Treibmittel (isobutan) beladenen PLA-Faser-Papiers mittels IR-Strahlung möglich war.

## 3.3.4 Halbzeugherstellung Route 4

*(DHBW Karlsruhe)*

### 3.3.4.1 Papierherstellung

Zur Herstellung der Papiere wurde der oben beschriebene Langfaserzellstoff verwendet. Die Papiere wurden ohne weitere Zusatzstoffe auf einem Rapid-Köthen-Blattbildner hergestellt. Dabei wird eine Faser-Wasser-Suspension benötigt, die durch Schwerkraft auf ein Sieb gedrückt wird. Dieses entstandene Papier wird dann getrocknet. In diesem Fall wird nicht der Rapid Köthen Trockner genutzt, da dieser mit Vakuum und Druck trocknet und somit das Papier verdichtet. Da die Vorversuche gezeigt haben, dass ein nicht-verdichtetes Halbzeug besser zur Umformung ist, werden die Blätter auf einem Sumet-Trockner getrocknet, der nur mit Wärme trocknet.

Die Additive werden in verschiedenen Verfahren auf das Halbzeug aufgebracht oder direkt im Papierprozess eingebracht. Dabei wird hier unterschieden zwischen Einbringung direkt im Prozess, Aufsprühen einer Lösung oder Suspension und Auftrag mit anderen Methoden.

#### 3.3.4.2 Auftragsmethode Sprühen

Zum Aufsprühen der Proben wurde eine Lösung mit dem gewünschten Additiv hergestellt. Die Lösungen weisen verschiedene Gehalte an Additiv auf und wurden dann mithilfe einer Sprühpistole auf das Halbzeug aufgebracht. Nach dem Trocknen wurde das Gewicht bestimmt, und mit der Berechnung des Flächengewichtes der Gehalt an Additiv im Halbzeug bestimmt. Der notwendige Gehalt an Additiv in der Lösung wurde durch empirische Verfahren ermittelt.

#### 3.3.4.3 Prozessmethode / Einbringen im Papierprozess

Im Falle von Lignin und Chitosan wurde das Additiv zusammen mit der Cellulosefaser im Aufschlaggerät desintegriert. Die Suspension wurde anschließend in ein Verteilergerät überführt und daraus sukzessive die benötigte Menge entnommen. Die zugesetzte benötigte Menge an Additiv wurde in Vorversuchen durch ein Korrelationsdiagramm ermittelt.

Dieses einfache Vorgehen war möglich, da Lignin und Chitosan weder quellen noch löslich sind. Im Falle von Gelatine und PVOH wurden deshalb andere Methoden genutzt (s. 3.3.4.2 Gelatine Aufsprühen; 3.3.4.3 PVOH).

#### 3.3.4.4 Einbringungsmethode Tauchen

Um die Halbzeuge gleichmäßig mit den verschiedenen Additiven zu benetzen, wurde auch das Verfahren des Tauchens geprüft. Dabei wurde eine Lösung hergestellt, das Halbzeug mithilfe eines Siebes für eine definierte Zeit eingetaucht, dann auf eine abweisende Oberfläche gelegt und getrocknet.

Für kein Additiv konnte ein ausreichend gutes Ergebnis erreicht werden, da die Papiere sehr instabil sind und sich beim Tauchen zerfasern. Deshalb wurde diese Einbringungsmethode nicht weiterverfolgt.

#### 3.3.4.5 Einbringungsmethode Walzen / Streichen

Für diese Methode wurde ebenfalls eine Lösung hergestellt, wie auch bei den anderen Verfahren. Mithilfe einer Walze und verschiedener Pinsel wurde ein Auftrag versucht. Auch hier, ähnlich wie beim Tauchen, reichte die Stabilität des Papiers nicht aus für ein gutes Ergebnis. Deshalb wurde auch diese Einbringungsmethode nicht weiterverfolgt.

#### 3.3.4.6 Gelatine

##### **Im Prozess**

Da Gelatine die Fähigkeit besitzt stark zu quellen, war die Methode im Aufschlaggerät nicht geeignet. Entweder entstand so viel Wärme, dass sich die Gelatine auflöste und damit bei der Blattbildung verloren ging, oder die Partikel des Gelatine-Pulvers verursachten Fehlstellen auf dem Halbzeug, weil sie durch starkes Quellen sehr viel Platz einnahmen und nach dem Trocknen Bereiche mit deutlich weniger Fasern hinterließen (Löcher).

Hierzu wurde eine Methode entwickelt, die ein Aufbringen der Gelatine mittels Aufsprühen ermöglichte. Die Gelatine wurde nach der Quellzeit durch Wärmezufuhr aufgelöst. Diese Lösung konnte dann mit einer Sprühvorrichtung auf das trockene Halbzeug aufgetragen werden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass durch Kapillareffekte die gelöste Gelatine durch das Gefüge transportiert wurde und eine gleichmäßige Verteilung vorliegt.

Der Anteil an Gelatine wurde gravimetrisch überprüft.

### **Aufsprühen**

Beide Gelatintypen konnten zur Herstellung einer Lösung mit 8% und 20% Lösung genutzt werden. Diese wurde zu Proben mit jeweils 8% und 20% Gelatine verarbeitet. Der Herstellungsprozess war nicht einwandfrei reproduzierbar.

#### 3.3.4.7 PVOH

### **Im Prozess**

PVH ist wasserlöslich. Damit war das Einbringen im Aufschlaggerät keine geeignete Methode. Da die Wasserlöslichkeit ein zeitabhängiger Vorgang ist, kam dieser Effekt zur Entwicklung einer neuen Methode zum Einsatz.

Die entsprechende Menge PVOH wurde unmittelbar vor dem Absaugen des Wassers dem Blattbildner zugeführt. Das Einhalten einer strengen Routine war zwingend erforderlich. Kleine Abweichungen im Füllstand und der Lösezeit veränderten den Gehalt am fertigen Halbzeug beträchtlich. Die genaue Menge an zugesetztem PVOH war durch Vorversuche mit einem Korrelationsdiagramm zu ermitteln. Da das Löseverhalten der einzelnen Typen unterschiedlich ist, musste für jede Type diese Korrelation erstellt werden. Bei einigen Typen war es notwendig das Pulver in Ethanol aufzuschlämmen, weil eine direkte Zugabe in den Blattbildner zu Klümpchenbildung geführt hat und damit keine gleichmäßige Verteilung des PVOHs gewährleistet war.

Getrocknet wurde im SUMET-Trockner zwischen Folien.

Eine Überprüfung des PVOH-Gehaltes erfolgte gravimetrisch.

### **Aufsprühen**

Aus den verschiedenen PVOH-Typen wurden Lösungen mit einem Gehalt zwischen 8 bis 20 Gew.-% PVOH hergestellt. Je nach Viskosität der Lösung konnten verschiedene Gehalte im Halbzeug erreicht werden; bei den hochviskosen Lösungen konnten damit nur geringere Gehalte im Halbzeug erreicht werden.

### **Auftrag**

Der Auftrag mithilfe eines Rakels oder Pinsels war nicht erfolgreich, da die Papiere dafür keine ausreichende Festigkeit besitzen und damit beschädigt wurden. Diese Aufbringungsmethode wurde damit nicht weiterverfolgt.

## **Tauchen**

Zuerst wurde verschiedene konzentrierte Lösungen hergestellt, in die die Papiere mithilfe eines feinmaschigen Siebes eingetaucht wurden. Selbst bei kurzem Eintauchen (ca. 1s) wurde schon so viel Feuchtigkeit vom Papier aufgenommen, dass sich die Fasern komplett auflösten und kein Papiergefüge mehr vorhanden war.

### 3.3.4.8 Chitosan

#### **Im Prozess**

Chitosan konnte nach Punkt 3.3.4.1.3 problemlos im Prozess in das Papierhalbzeug eingearbeitet werden. Danach wurde das entstandene Faserfließ im SUMET-Trockner ohne Druck getrocknet. Um Chitosan zu ‚aktivieren‘ muss es noch mit einer Säure in Kontakt kommen. Dazu wurde zwei- oder dreiprozentige Essigsäure auf das trockene Halbzeug aufgesprüht. Das Halbzeug fühlte sich nun deutlich schmierig an, was ein Hinweis auf einen gelungenen Löseprozess darstellt. Anschließend wird das Halbzeug an Luft getrocknet.

Die richtige Menge an Essigsäure wurde gravimetrisch überprüft.

#### **Aufsprühen**

Aufgrund der hohen Viskosität der hergestellten Lösungen konnten diese nicht im Sprühverfahren aufgebracht werden. Deshalb wurde bei Chitosan auf Prozessproben zurückgegriffen.

## **3.4 Verarbeitungsprozess und Industrietransfer (AP 3)**

### **3.4.1 Thermoformen im Technikumsmaßstab**

*(DHBW Karlsruhe)*

Die Thermoformversuche wurden auf einem Kleinformgerät KFG 37 der Firma Illig Maschinenbau GmbH durchgeführt. Zur Prozessentwicklung des Thermoformens wurde ein Spannrahmen konstruiert, mit dem man zwei Halbzeuge gleichzeitig thermoformen kann.

Das zu umformende Material wird im Spannrahmen eingespannt und mit einer Oberheizung erwärmt. Dabei wird mit einem Handhebel der Formtisch mit Werkzeug nach oben zum Spannrahmen bewegt. Dann wird das Vakuum angelegt, und die Probe umgeformt. Nach dem Umformen kann das Material mittels eines Gebläses abgekühlt werden.

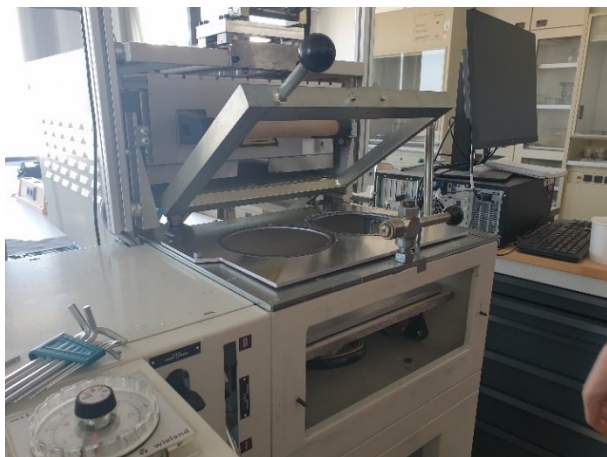


Abbildung 2: Kleinformgerät an der DHBW

Zum Umformen der Halbzeuge wurde eine runde Form mit Radien entwickelt, die 25mm hoch ist und an die runde Form der Halbzeuge aus der Papierherstellung angepasst ist.

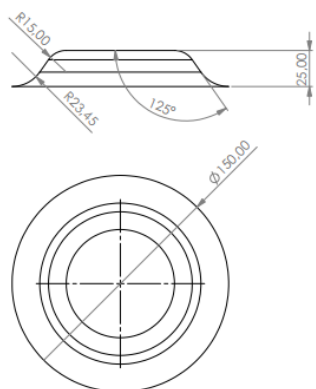


Abbildung 12: Technische Zeichnung des Werkzeuges



Abbildung 13: Versuchsform aus Aluminium

### 3.4.1.1 Route 1: Compound mit Fasern

Die Versuche wurden auf dem Kleinformgerät KFG 37 durchgeführt. Der Thermoformprozess konnte hier wie bei herkömmlichen Kunststoffherzeugnissen durchgeführt werden. Im Technikummaßstab wurden die CP-Proben mit 10, 15 und 20% Rettenmaier-Fasern verarbeitet.

Folgende Einstellungen wurden genutzt: Oberheizung 325°C, Vakuum 1bar und Vorheizzeit 90s.

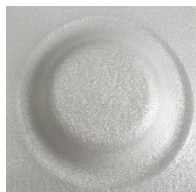



Nullprobe	10% Fasern	15% Fasern	20% Fasern
			

Abbildung 14: Fotos von Nullprobe und Proben mit verschiedenen Fasergehalten

Mit Fasern war eine höhere Temperatur notwendig als bei der Nullprobe. Da die Versuche im Technikumsmaßstab erfolgreich waren, wurden diese gleich in den Industriemaßstab bei Firma Mack überführt.

#### 3.4.1.2 Route 2: Papiere mit gasbeladenen Mikrobeads

Auf zwei Verfahren wurden die Mikrobeads in die Papiere eingebracht.

1. Verfahren: Einbringen direkt im Papierherstellungsprozess → da die Mikrobeads eine geringere Dichte als die Papierfasern haben, schwimmen diese immer auf und verbinden sich nicht mit dem Papiergefüge. Aus diesem Grund wurde das zweite Verfahren entwickelt.
2. Verfahren: es wurden 3 Lagen Papier à 100g/m<sup>2</sup> mit zwei Lagen Mikrobeads à 5 Gew-% / 20 Gew.-% zusammengepresst (vergautschen und dann auf Sumet-Presse trocknen). Um die Haftung zwischen den Lagen zu verbessern, wurden die Papiere mit Stärke eingesprüht, was aber auch zu einer erhöhten Haftung an den Thermoform-Werkzeugen führte. Damit war ein Entformen nur schwer möglich.

Außerdem wurden Papiere mit Kurz- und Langfasern hergestellt.

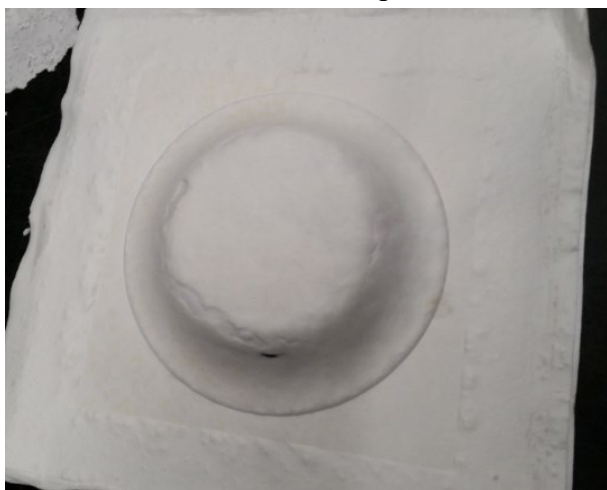


Abbildung 15: Dreilagige Probe mit 20% PLA-Beads in den Zwischenlagen, aus der ersten Versuchsreihe

Bei den ersten Versuchen wurde festgestellt, dass sich die Mikrobeads aufgrund ihrer Größe nicht zu einer einheitlichen Schicht aufschmelzen lassen und damit auch die Thermoformbarkeit nicht verbessern.

Zur Optimierung wurden die Mikrobeads am Fraunhofer ICT gemahlen. Da die Korngröße immer noch zu groß war, konnten hierdurch auch keine besseren Ergebnisse erreicht werden.

Daraufhin wurde diese Route nach den Versuchen im Technikumsmaßstab gestoppt.

#### 3.4.1.3 Route 3: Polymerfasern im Papier

Die im vorigen Kapitel, Halbzeugherstellung beschriebenen Proben wurden nun auf ihre Thermoformbarkeit getestet.

Da die optimale Verarbeitungstemperatur der verwendeten PLA-Type bei ca. 150°C liegt, wurde bei dieser Temperatur umgeformt. Dafür wurde die Temperatur an der Anlage auf 400°C eingestellt. Mithilfe einer Kontaktwärmemessung wurde die Temperatur an den Proben gemessen, um sicherzustellen, dass maximal 150°C vorhanden waren. Nach 5s wurde die erwünschte Temperatur erreicht und dann mit 1 bar umgeformt. Eine Thermoformbarkeit war bei allen Proben nicht ausreichend vorhanden. Die besten Ergebnisse wurden mit einem Gehalt von 60% PLA-Fasern mit der Dicke 25µm erreicht, siehe Bilder.

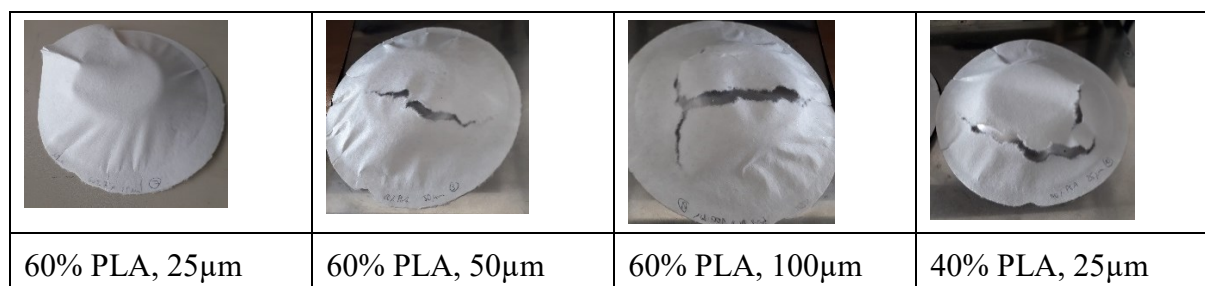


Abbildung 16: Fotos von Formlingen mit PLA-Fasern

#### 3.4.1.4 Route 4: Additive im Papier

Für das Umformen mit dem Celluloseverbundwerkstoff wurde der eigentliche Prozess des Thermoformens modifiziert. Die Prozessparameter blieben für alle Umformversuche konstant, nachdem die optimalen Parameter ermittelt wurden. Als Temperatur wurde am Kleinformgerät 300 C° eingestellt. Das befeuchtete Halbzeug wurde anschließend in den Spannrahmen eingespannt. Daraufhin wurde der Schlitten mit den Heizelementen hervorgezogen und das feuchte Halbzeug für 30 Sekunden beheizt. Ein Infrarotsensor zeigte dabei eine Temperatur an der Oberfläche des Halbzeugs zwischen 80 und 90 C° an. Das Vakuum wurde auf 1 bar eingestellt. Nach 30 Sekunden wurde der Heizschlitten zurückgefahren und gleichzeitig der Hebel zum eigentlichen Umformen betätigt. Daraufhin wurde der Heizschlitten erneut nach vorne über den nun entstandenen Formling bewegt und das Halbzeug für weitere 5 min getrocknet. Nach dem Trocknen konnte der Formling entformt werden.

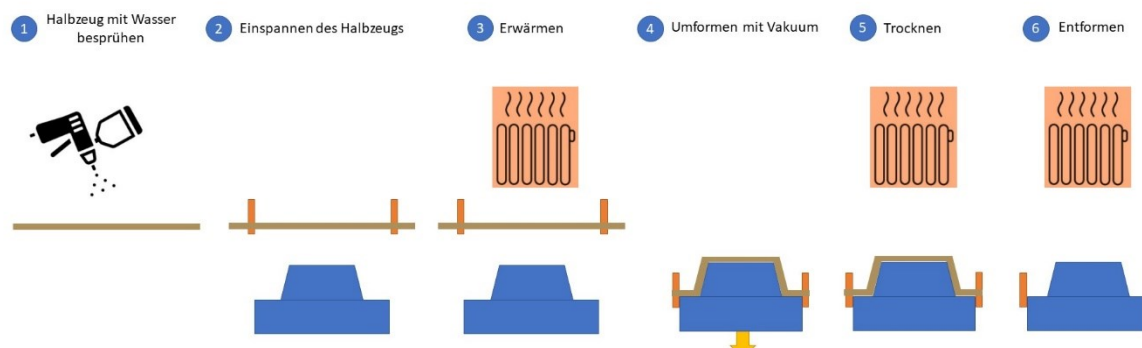


Abbildung 17: Schematischer Thermoformprozess von Papierhalbzeugen

Zum Vergleich der nachfolgenden Proben wurde eine Nullprobe, d.h. ein unbehandeltes 100g/m<sup>2</sup> Papier aus NBSK nach dem oben beschriebenen Verfahren umgeformt. Diese Probe gilt als Referenz für die nachfolgenden Versuche.



Abbildung 18: Nullprobe, feucht umgeformt

#### 3.4.1.4.1 Gelatine

Durch die starke Klebrigkeit der Proben mit Feuchtigkeit, war das Umformen nicht problemlos möglich. Gelatine führte zu einem nicht ausreichend guten Verbund innerhalb des Werkstoffes, und damit zu einer nicht ausreichenden Dehnung zwischen 8-10% in feuchtem Zustand, was nicht zur Umformung reichte.



Abbildung 19: Proben mit 20% Gelatine, umgeformt mit 65% Feuchtigkeit

#### 3.4.1.4.2 Chitosan

Um Proben mit Chitosan umformen zu können, ist erst eine Aktivierung des Chitosans notwendig, um es wasserlöslich zu machen. Dazu wird eine Säure verwendet (siehe Kapitel 3.2.4

Chitosan). Versuche wurden mit verschiedenen Säuren durchgeführt: Essigsäure, Zitronensäure und Apfelsäure.

In Kombination mit den Fasern führte Essigsäure zu den besten Ergebnissen. Deshalb wurde diese für die folgenden Versuche verwendet.

Zur Umformung wurden die Chitosan-Papiere mit Essigsäure aktiviert ( $80 \pm 5$  % Feuchtigkeit mit 3%-iger Säurelösung). Eine Umformung gleich nach der Aktivierung war nicht möglich, da die Essigsäure keine ausreichende Zeit hatte mit der Cellulose zu reagieren. Die daraus resultierende Dehnung der Proben war im Gegensatz zur Nullprobe nicht erhöht.

Daraufhin wurde das Verfahren weiterentwickelt. Nach der Aktivierung wurden die Proben 24h lang bei Raumtemperatur getrocknet. Zur Umformung wurden diese analog des oben beschriebenen Umformprozesses erneut befeuchtet und umgeformt.

Dadurch konnte in feuchtem Zustand ( $65 \pm 5$ %) eine Dehnung von bis zu 15% erreicht werden, was die Umformung der runden Schale möglich macht.

Mit Chitosan D konnte die höchste Dehnung und Zugfestigkeit, und damit auch die beste Umformbarkeit erreicht werden.

#### 3.4.1.4.3 PVOH

Wie oben beschrieben, ist auch bei der Umformung von PVOH eine gewisse Feuchtigkeit im Halbzeug notwendig. Die besten Ergebnisse konnten mit PVOH D (6/88) erreicht werden. Dafür wurden Gehalte zwischen 8 und 20% im Halbzeug getestet.

Auch bei Anpassung des Thermoform-Prozesses kam es weiterhin zu Rissen. Außerdem ist die Entformung aus den Werkzeugen durch die hohe Klebrigkeit der Proben schwierig. Dafür war eine Vorbehandlung der Proben mit Teflon-Spray notwendig, was aber auch keine vollständige Lösung dieses Problems darstellte.

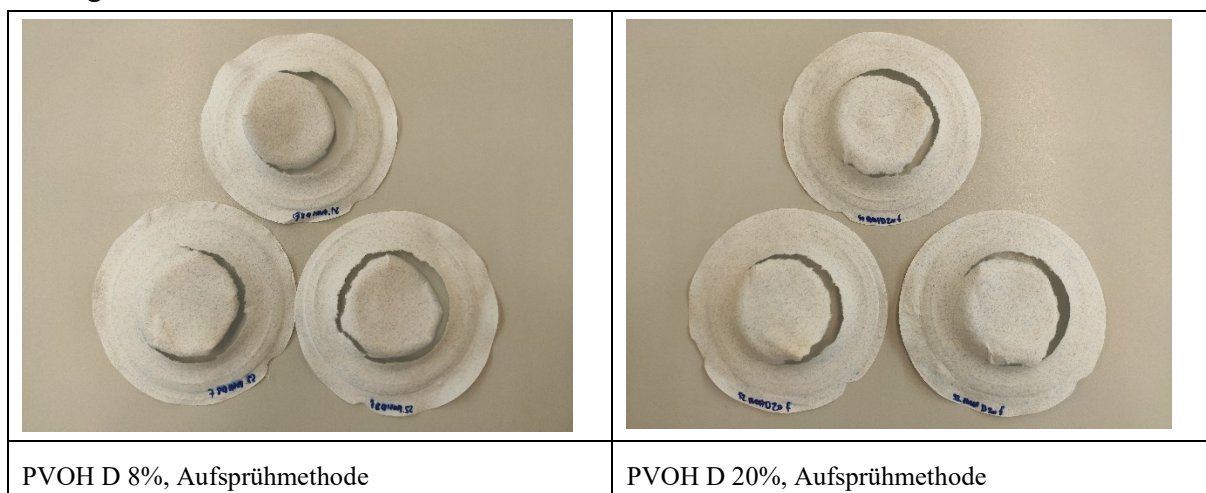


Abbildung 20: Fotos Umformlinge mit PVOH, Aufsprühhmethode

Die Umformung der Prozessproben führte zu besseren Ergebnissen. Die Entformung war auch hier nur mit zusätzlichem Teflonspray möglich.

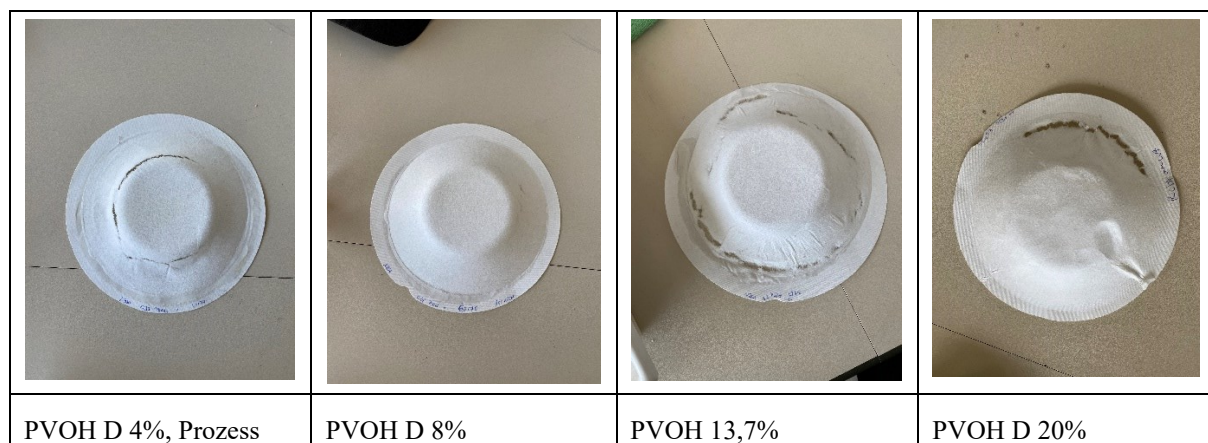


Abbildung 21: Fotos Umformlinge mit PVOH, Prozessmethode

### 3.4.2 Thermoformen im Industriemaßstab

(Mack GmbH)

Die Thermoformversuche wurden auf einer Einzelplatz Plattenformanlage der Firma Illig UA100 4g mit Oberstempel durchgeführt. Als Rahmengrößen wurden die Formate 250 x 250 mm und 330 x 330 mm festgelegt. Die Heizung ist mit Quarzstrahlern ausgestattet, da diese das breiteste IR-Strahlenfenster haben, welches für fast alle Materialien funktioniert. Bei größeren Serien wäre ein Wechsel auf eine größere Anlage sinnvoll, wie z.B. Geiss TS1 oder ein Rollenautomat. Diese werden mit Servomotoren betrieben und sind mit IR Flashstrahlern ausgestattet.



Abbildung 22: Plattenformanlage der Firma Illig

Teilweise wurde ein Oberstempel bei der Umformung verwendet. Darauf wird in den folgenden Passagen näher darauf eingegangen.

#### 3.4.2.1 Route 1

Die Materialien aus Route 1 CP/Jelu Pulver und CP/Rettenmaier Faser hatten ein gutes Umformverhalten mit ähnlichen Verstreckungsgraden.

Bei CP und Rettenmaier-Fasern wurde weniger Aufheizzeit (ca. 1s) benötigt als für CP mit Jelu-Fasern. Das Material neigt durch die gröbere Struktur an den Innenecken zum Aufreißen.

Aufgrund der Dickentoleranzen, welche speziell das mit Rettenmaier-Fasern gefüllte Material aufweist, gab es größere Schwankungen im Ergebnis.

Ein optimales Thermoformen im Industriemaßstab setzt eine Dickentoleranz von +/- 0,25 mm voraus, um optimale Umform- und Fließeigenschaften des Materials zu erhalten.

Bei CP mit Jelupulver war dies der Fall. Das Material weist ein besseres Fließverhalten auf und hat ein größeres Temperaturfenster, in welchem es sich verformen lässt ohne zu reißen.

Ein Oberstempel wurde zur Optimierung der Versuche verwendet.

Der Oberstempel für CP Material musste aufgrund der geringen Materialstärke sowie den empfindlichen Eigenschaften in Bezug auf Rissbildung durch Druck- und Zugkräfte separat geführt werden. Hierfür wurde außerhalb des Bauteils eine Schräge angeformt, welche den Oberstempel vor dem Bauteil aufnimmt, das Material an teilweise absichert, und gleichzeitig als Führung für das Bauteil fungiert.

Eine Weiterentwicklung könnte auch im Bereich Prozesstechnik sein.

Alternativ könnte mit einer Kombination aus klassischer Vakuumformmaschine und einer Kiefel Fiber Thermoforming Maschine gearbeitet werden. Die Kiefel Maschine hat bereits alle Komponenten für den Umgang mit Feuchtigkeit und Vakuum sowie Maschinenteile und Feuchtigkeit gelöst.

Der Trocknungsprozess könnte ebenfalls übernommen werden. Hier wird mit einem zweiten sehr heißen Aluminium-Oberstempel gearbeitet, sowie Formen aus gesintertem Aluminium, durch welche die Feuchtigkeit abgezogen werden kann, bzw abtrocknen kann.

Das Vakuum bzw. Absaugung läuft nicht über klassische Vakuumpumpen sondern Nass Saugern mit Filtereinheiten sowie einem Maschineninnenraum aus Edelstahl.



Abbildung 23: Oberstempel mit Schräge

### 3.4.2.2 Route 3

Die gleichen Proben wie bei den Versuchen im Technikumsmaßstab wurden nun auf den Anlagen der Firma Mack umgeformt. Lediglich Proben mit 100 $\mu$ m-Fasern wurden ausgespart, da mit diesen schon im Technikumsmaßstab keine Umformung möglich war.

Umgeformt wurden Proben mit 25 $\mu$ m und 50 $\mu$ m starken PLA-Fasern, die unbeladen und beladen vorlagen. Die Prozessparameter wurden nicht verändert. Umgeformt wurde mit Hitze und Oberstempel, ohne Feuchtigkeit.

Es war kein Unterschied zwischen beladenen und unbeladenen Proben erkennbar. Auch die Faserdicke zeigten keine klaren Unterschiede, siehe Bilder.

Es kam durchgängig zu Rissen am oberen Rand, die auch durch eine Prozessanpassung nicht vermindert werden konnten.

Eine Umformung auf Thermoformanlagen konnte also auch im Industriemaßstab nicht nachgewiesen werden.

25 $\mu$ m Fasern		50 $\mu$ m Fasern	
Unbeladen	Beladen	Unbeladen	Beladen

Abbildung 24: Formlinge mit PLA-Fasern, beladen und unbeladen

### 3.4.2.3 Route 4

Da das Papier mit Chitosan aufgrund seiner Luftdurchlässigkeit nicht nur mit Vakuum umgeformt werden konnte, wurden die Versuche auf einer Anlage mit Oberstempel durchgeführt, um mit Vakuum und formschlüssigem Druck zu arbeiten.

Die Parameter für das Umformen im Industriemaßstab konnten vom Technikumsmaßstab übernommen werden.

Hier gibt es noch ein paar Einflussgrößen, die das Thermoformen im Industriemaßstab erschweren:

- Papiergröße
- Feuchtigkeit
- Oberstempelausrichtung / Führung
- Trocknung

Da die Probengröße zu gering für den kleinsten Spannrahmen war, mussten die Proben auf eine Trägerplatte geklebt werden, um eine Umformung auf der Anlage zu ermöglichen.

Da die Rohlinge Wasser zum Umformen benötigen, gelangt Feuchtigkeit in eine Anlage, welche nicht für diese konzipiert ist. Dadurch kann Feuchtigkeit in die Vakuumpumpen kommen bzw. es kommt zu Korrosion in der Anlage.

Ein weiterer Punkt ist das Trocknen der Proben in der Tiefziehanlage auf dem Werkzeug, bis es eine gewisse Festigkeit erreicht hat. Hierfür müsste kurzfristig mehr Wärme auf das Werkzeug aufgebracht werden, sowie zusätzliche Luft durch das Werkzeug für die Trocknung.

Alternativ könnte mit einer Kombination aus klassischer Vakuumformmaschine und einer Kiefel Fiber Thermoforming Maschine gearbeitet werden. Die Kiefel Maschine hat bereits alle Komponenten für den Umgang mit Feuchtigkeit und Vakuum sowie Maschinenteile und Feuchtigkeit entsprechend vorbereitet.

Der Trocknungsprozess könnte ebenfalls übernommen werden. Hier wird mit einem zweiten sehr heißen Aluminium-Oberstempel gearbeitet, sowie Formen aus gesintertem Aluminium, durch welche die Feuchtigkeit abgezogen bzw abtrocknen kann.

Das Vakuum bzw. Absaugung läuft nicht über klassische Vakuumpumpen, sondern mit Nass Saugern mit Filtereinheiten sowie einem Maschineninnenraum aus Edelstahl.

### 3.4.3 Fazit aus den vorangegangenen Versuchen und weiteres Vorgehen

Nach den Versuchen im Technikums- und Industriemaßstab war es möglich die Anzahl der Lösungen einzuschränken, da nur Route 1 und Route 4 eine Verformung auf Thermoformanlagen ermöglichten.

Für die Demonstratoren wurden demnach nur noch diese beiden Routen weiterverfolgt und charakterisiert, siehe aktualisierte Roadmap.

Bei Route 1 wurden zwei Alternativen verfolgt; erstens CP mit Rettenmaier-Fasern und zweitens CP mit Jelu-Fasern. Beides sind geschäumte Erzeugnisse. CP mit Rettenmaier-Fasern zeigt

eine rauere Struktur und naturbraune Färbung auf, während CP mit Jelu-Fasern einen perlmuttartigen Schimmer und eine feinere Struktur aufweist.

Als Route 4 wurden Proben mit Chitosan weiterverfolgt und als Demonstratoren umgesetzt. Wie auch bei den bisherigen Versuchen werden die Demonstratoren aus einlagigen Papieren hergestellt. Denkbar ist es aber auch diese mehrlagig zu verwenden. Dabei können diese einzeln umgeformt und danach durch ein geeignetes Verbindungsmittel (z.B. Stärkeleim) verbunden werden.

## Roadmap 3D-Thermocell

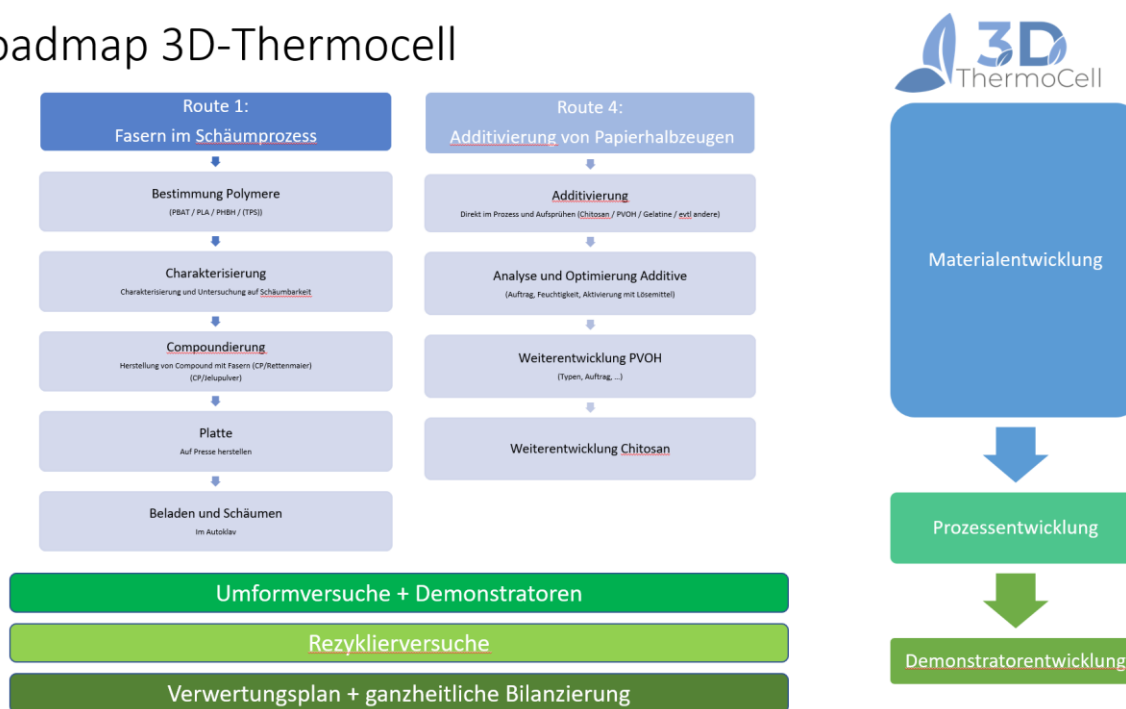


Abbildung 25: Roadmap Lösungen für Demonstratoren

### 3.4.4 Druck- und Weiterverarbeitungsversuche

(Mainteam GmbH)

#### 3.4.4.1 Druckversuche

##### Ziel der Druckversuche

Mithilfe der Druckversuche soll herausgefunden werden, ob sich die entwickelten Materialien dazu eignen im Flexodruck-Verfahren und im Digitaldruck bedrucken zu lassen. Dazu wurden anhand eines Hand Ink Proofer's wasserbasierte Flexodruckfarben auf die Materialien aufgebracht und Testdrucke mithilfe von zwei unterschiedlichen Digitaldruckmaschinen durchgeführt.

##### Proofgerät, Hilfsmittel und Digitaldrucker für die Druckversuche

Für die Flexodruckversuche wurde als Prüfgerät ein Hand Ink Proofer der Firma Jarp eingesetzt. Das Prüfgerät eignet sich zum Aufbringen von Flexodruckfarbe auf Bedruckstoffe, ohne

industrielle Flexodruckmaschinen für Druckversuche nutzen zu müssen. Das Gerät besteht aus einer Halterung mit einer farbaufnehmenden Rasterwalze (Anilox roll) und einer farbabquetschenden und farbübertragenden Gummiwalze. Die Rasterwalze hat Vertiefungen mit definierter Geometrie. Die Geometrie legt die Menge der Farbe fest, die übertragen werden soll. Die Rasterwalze kann getauscht werden um, verschiedene industriell übliche Farbmengen auf Bedruckstoffe übertragen zu können. Für die Versuche standen drei verschiedene Rasterwalzen zur Verfügung, die Näpfchengemetrien mit 100 LPI (Lines per Inch), 200 LPI und 300 LPI haben. Je höher die Anzahl der LPI, desto weniger Farbe wird übertragen.



Abbildung 26: Hand Ink Proofer mit Flexodruckfarbe (CMYK) und Pipetten

Für die Digitaldruckversuche wurden zwei verschiedene Druckertypen eingesetzt. Mit dem UV-Flachbettdrucker Arizona XT 2260 XT von Canon werden mithilfe von Tintenstrahldüsen Druckdaten auf Bedruckstoffe übertragen. Die Tinte härtet unter UV-Licht unmittelbar nach dem Aufbringen aus. Ein Inkjet-Drucker mit wasserbasierter Farbe wurde nicht eingesetzt, da die Schäume aus Route 1 zu dick für den Einschub des verfügbaren Inkjet-Druckers sind. Als Alternative wurde der Laserdrucker Xerox 700 eingesetzt, der Tonerfarben auf Bedruckstoffe überträgt.



Abbildung 27: UV-Flachbettdrucker und Laserdrucker

## Durchführung der Druckversuche

Als Testmaterialien wurden die beiden CP-Schäume aus Route 1, das Papier mit Additiven aus Route 4 und eine vollständig aus Cellulose bestehende Papier-Referenz verwendet:

- 80% CP, 20% Cellulosefasern (Route 1)
- 80% CP, 20% Cellulosepulver (Route 1)
- 94% NBSK, 6 % Chitosan (Route 4)
- 100% Cellulosefasern

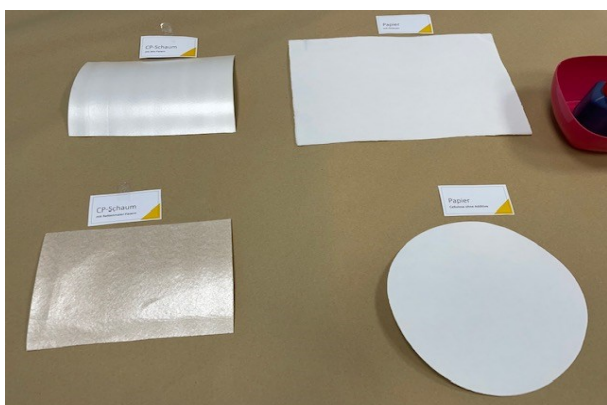


Abbildung 28: Getestete Materialien

Für die Digitaldruckversuche wurde eine Testdruckform angelegt, die verschiedene Schriftgrößen einschließlich Negativabbildung, einen 24-farbigen Farbkreis inklusive der Grundfarben Cyan, Magenta und Gelb, sowie ein komplexes Druckbild enthält. Die Testform wurde auf allen 4 Prüfmaterialien mithilfe des UV-Flachbettdruckers und des Laserdruckers gedruckt.



Abbildung 29: Digitaldruckversuche mit UV-Flachbettdrucke und Laserdrucker

Für die Flexodruckversuche wird die Rasterwalze des Hand Ink Proofers durch eine Stell- schraube an die Gummiwalze beigestellt. Mithilfe von Pipetten wird die Flexodruckfarbe auf die Kontaktstelle von Gummiwalze und Rasterwalze gegeben. Durch den engen Kontakt der Rasterwalze zur Gummiwalze läuft keine Farbe weg. Bei Abrollen der Gummiwalze auf einem

Bedruckstoff, wird die Farbmenge übertragen, die durch die Rasterwalzengeometrie der eingesetzten Walze definiert ist.

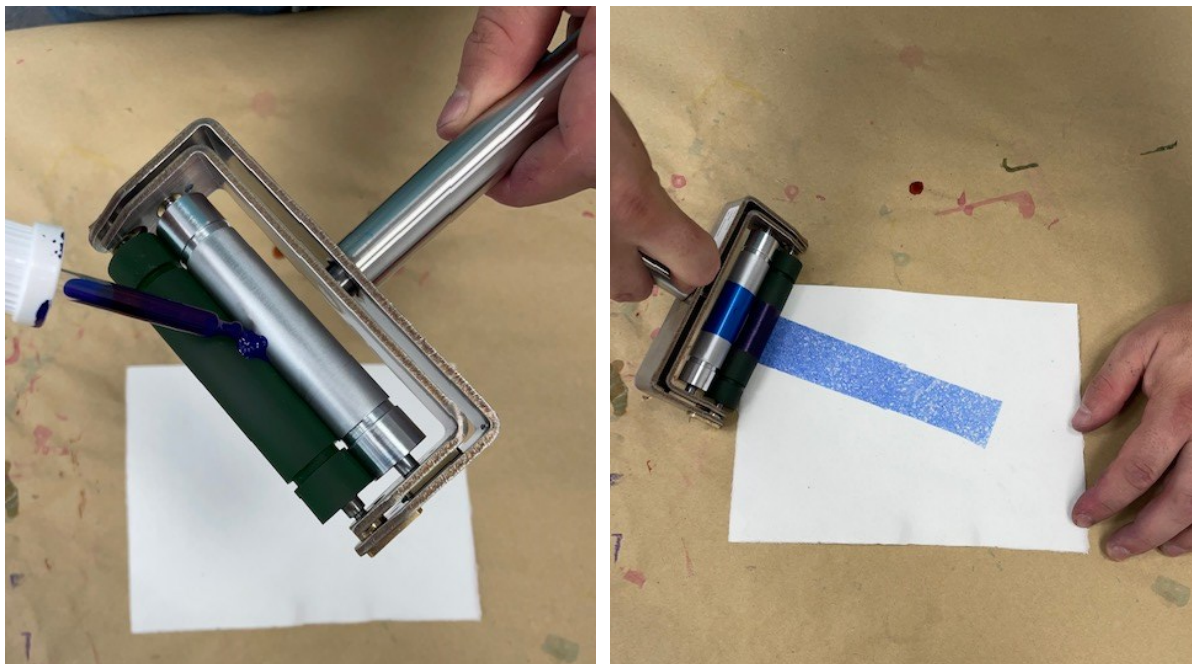


Abbildung 30: Aufbringen der Flexodruckfarbe auf den Bedruckstoff

Die übertragene Farbe wurde einem Wischtest nach 3, 10, 30 und 60 Sekunden unterzogen, um herauszufinden, wie schnell die Farbe auf den Materialien durch Wegschlagen ins Material und Trocknung aushärtet. Es wurden die Grundfarben Cyan, Magenta, Gelb sowie Schwarz getestet. Die Testergebnisse können aufgrund der unterschiedlichen Pigmente und Zusammensetzung pro Druckfarbe unterschiedlich ausfallen.



Abbildung 31: Wischtest der übertragenen Flexodruckfarben

### Ergebnisse der Druckversuche

Die Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse der Digitaldruckversuche. Die obere Reihe stellt von links nach rechts die Ergebnisse des UV-Flachbettdruckers von Route 1, Route 4 und der Cellulose-Referenz dar. Die untere Reihe zeigt die Ergebnisse des Laserdruckers unter gleichbleibender Materialfolge von links nach rechts.



Abbildung 32: Druckergebnisse Digitaldruck

Die Ergebnisse werden gemeinsam mit den Flexodruckversuchen tabellarisch ausgewertet.

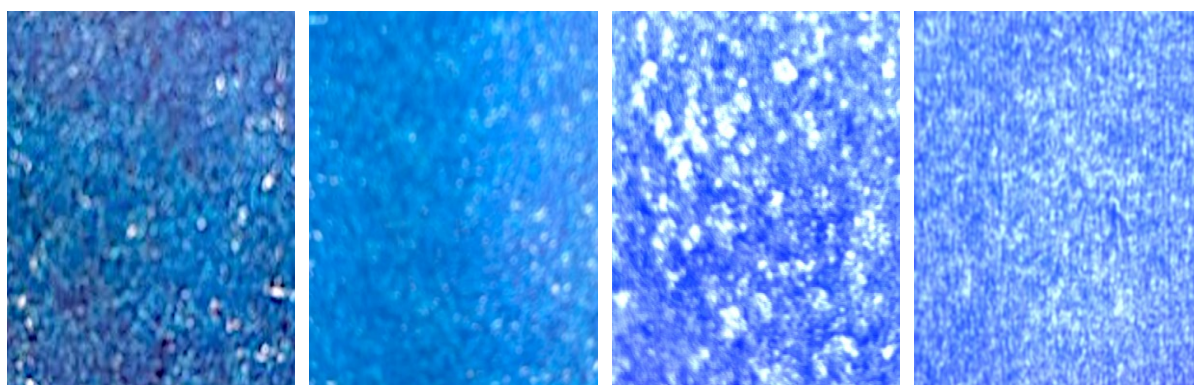


Abbildung 33: Übertragung von Flexodruckfarbe am Beispiel Cyan mit 100 LPI Rasterwalze

Drucker/Prüfgerät	Farbton	Rasterwalze	Farbhaftung	Route 1 Fasern im Schäumprozess		Route 4	Referenz Papier
				80% CP, 20% Cellulosefasern	80% CP, 20% Cellulosepulver	94% NBSK, 6% Chitosan	100% Cellulosefasern
Digitaldruck Tinte UV	Cyan K		sofort	✓	✓	✓	✓
Digitaldruck Toner	Cyan K		sofort	X Blasses Druckbild	X Blasses Druckbild	✓	✓
Handproofers für Tinte	Cyan	100 LPI	3 Sek	✓ leicht verwischt	X deutlich verwischt	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt
Handproofers für Tinte	Cyan	100 LPI	10 Sek	✓	X deutlich verwischt	✓	✓
Handproofers für Tinte	Cyan	100 LPI	30 Sek	✓	X deutlich verwischt	✓	✓
Handproofers für Tinte	Cyan	100 LPI	60 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Magenta	100 LPI	3 Sek	X deutlich verwischt	X deutlich verwischt	X deutlich verwischt	✓ leicht verwischt
Handproofers für Tinte	Magenta	100 LPI	10 Sek	X deutlich verwischt	X deutlich verwischt	X deutlich verwischt	✓ leicht verwischt
Handproofers für Tinte	Magenta	100 LPI	30 Sek	✓ leicht verwischt	X deutlich verwischt	✓	✓
Handproofers für Tinte	Magenta	100 LPI	60 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Yellow	100 LPI	3 Sek	X deutlich verwischt	X deutlich verwischt	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt
Handproofers für Tinte	Yellow	100 LPI	10 Sek	X deutlich verwischt	X deutlich verwischt	✓	✓
Handproofers für Tinte	Yellow	100 LPI	30 Sek	X deutlich verwischt	X deutlich verwischt	✓	✓
Handproofers für Tinte	Yellow	100 LPI	60 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Keyline	100 LPI	3 Sek	X deutlich verwischt	X deutlich verwischt	X deutlich verwischt	✓ leicht verwischt
Handproofers für Tinte	Keyline	100 LPI	10 Sek	X deutlich verwischt	X deutlich verwischt	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt
Handproofers für Tinte	Keyline	100 LPI	30 Sek	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt	✓	✓
Handproofers für Tinte	Keyline	100 LPI	60 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Cyan	200 LPI	3 Sek	✓ leicht verwischt	X deutlich verwischt	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt
Handproofers für Tinte	Cyan	200 LPI	10 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Cyan	200 LPI	30 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Cyan	200 LPI	60 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Magenta	200 LPI	3 Sek	X deutlich verwischt	X deutlich verwischt	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt
Handproofers für Tinte	Magenta	200 LPI	10 Sek	X deutlich verwischt	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt
Handproofers für Tinte	Magenta	200 LPI	30 Sek	✓ leicht verwischt	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Magenta	200 LPI	60 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Yellow	200 LPI	3 Sek	✓ leicht verwischt	X deutlich verwischt	✓	✓
Handproofers für Tinte	Yellow	200 LPI	10 Sek	✓	X deutlich verwischt	✓	✓
Handproofers für Tinte	Yellow	200 LPI	30 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Yellow	200 LPI	60 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Keyline	200 LPI	3 Sek	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt
Handproofers für Tinte	Keyline	200 LPI	10 Sek	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt	✓	✓
Handproofers für Tinte	Keyline	200 LPI	30 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Keyline	200 LPI	60 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Cyan	300 LPI	3 Sek	✓ leicht verwischt	X deutlich verwischt	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt
Handproofers für Tinte	Cyan	300 LPI	10 Sek	✓	✓ leicht verwischt	✓ leicht verwischt	✓
Handproofers für Tinte	Cyan	300 LPI	30 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Cyan	300 LPI	60 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Magenta	300 LPI	3 Sek	✓	✓ leicht verwischt	✓	✓
Handproofers für Tinte	Magenta	300 LPI	10 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Magenta	300 LPI	30 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Magenta	300 LPI	60 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Yellow	300 LPI	3 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Yellow	300 LPI	10 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Yellow	300 LPI	30 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Yellow	300 LPI	60 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Keyline	300 LPI	3 Sek	✓	✓ leicht verwischt	✓	✓
Handproofers für Tinte	Keyline	300 LPI	10 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Keyline	300 LPI	30 Sek	✓	✓	✓	✓
Handproofers für Tinte	Keyline	300 LPI	60 Sek	✓	✓	✓	✓

inhomogene Farbannahme

X = gescheitert

✓ = gelungen

Abbildung 34: Auswertung der Druckversuche

## Fazit zu den Druckversuchen

Die Bedruckung mit UV-Druckern, die beispielsweise in der Werbetechnik eingesetzt werden, ist unkritisch. Die Druckergebnisse sind materialübergreifend gelungen. Der Laserdruck funktioniert lediglich bei der Cellulose-Referenz. Die Materialien aus Route 1 konnten nur mit blassem Bild bedruckt werden. Das Material aus Route 4 konnte im Laserdruck nur fleckig-inhomogen bedruckt werden.

Die wasserbasierten Flexodruckfarben haften grundsätzlich auf allen 4 Bedruckstoffen. Tendenziell dauert es für die Materialien aus Route 1 etwas länger, bis sie wischfest sind. Je weniger Farbe übertragen wird, desto schneller haftet die Farbe. Im industriellen Maßstab gäbe die Möglichkeit die Farbtröcke, z.B. durch einen Infrarottrockner zu beschleunigen.

### 3.4.4.2 Schneid- und Rillversuche

#### Ziel der Schneid- und Rillversuche

In Bezug auf der Weiterverarbeitbarkeit der Materialien wurden Versuche mithilfe von Ziehmesser, oszillierendem Messer und einem Guillotine-Messer durchgeführt. Es wurde getestet, ob die Materialien - ohne einen sauberen Schnitt zu erzielen brechen - einreißen oder quetschen. Mithilfe von Rillwerkzeugen wurden Faltnlinien eingebracht, um die Durchführbarkeit von Faltungen der Winkel  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $180^\circ$  ohne Aufplatzen der Oberflächenstruktur zu untersuchen. Zusätzlich wurde die Möglichkeit der Einbringung von Perforationen geprüft.

#### Geräte und Werkzeuge für die Schneid- und Rillversuche

Die Abbildung 27 zeigt im linken Bildbereich den für Schneid- und Rillversuche eingesetzten Flachbettplotter von Zünd mit der Bezeichnung ProCut 2500 L. Im rechten Bildbereich sind in den Aufnahmemodulen, erkennbar an gelb-schwarzen und dreieckigen Gefahrensymbolen, von links nach rechts die folgenden Werkzeuge montiert:

- Ziehmesser (Universal Cutting Tool UCT)
- Rillrad Breite 1,5 mm, max. Tiefe 1,0 mm
- Perforationsmesser 5-5 (5 mm Schnitt, 5 mm ungeschnitten)

Vor den Modulen liegen von links nach rechts die übrigen in den Versuchen verwendeten Flachbettplotter-Werkzeuge:

- Oszillierendes Messer (Electric Oscillating Tool EOT)
- Rillrad Breite 0,7 mm, max. Tiefe 1,0 mm)
- Perforationsmesser 1-1 (1 mm Schnitt, 1 mm ungeschnitten)



Abbildung 35: Flachbettplotter von Zünd mit eingesetzten Versuchswerkzeugen (rechts im Bild)

Als weiteres Gerät wurde die elektrische Schneidemaschine IDEAL 5222 Digicut mit einem Guillotine-Messer eingesetzt. Hiermit können mehrere Materialschichten bei einem Schneidvorgang durchtrennt werden.



Abbildung 36: Elektrisches Schneidegerät von IDEAL mit Guillotine-Messer

### **Durchführung der der Schneid- und Rillversuche**

Als Testmaterialien wurden die beiden CP-Schäume aus Route 1, das Papier mit Additiven aus Route 4 und eine vollständig aus Cellulose bestehende Papier-Referenz verwendet:

- 80% CP, 20% Cellulosefasern (Route 1)
- 80% CP, 20% Cellulosepulver (Route 1)
- 94% NBSK, 6 % Chitosan (Route 4)
- 100% Cellulosefasern

Alle 4 Testmaterialien wurden jeweils 24 Prüfungen unterzogen, die sich in Schneid-, Perforier- und Rillversuche unterteilen lassen. Es wurden runde Proben mit einem Durchmesser von 200 mm verwendet. Die Versuche wurden unter Einsatz der Maschinen Zünd ProCut 2500 L und Ideal 5222 Digicut durchgeführt.

### **Schneidversuche mit der Ideal 5222 Digicut**

In die Ideal 5222 Digicut Schneidemaschine werden die Materialproben mit Hilfe eines Niederhalters, der mit einem Fußpedal bedient wird, festgehalten. Zum Auslösen eines Schnittes mit dem Guillotine-Messers werden mit der linken und rechten Hand zeitgleich zwei Knöpfe gedrückt. Geprüft wurde jeweils, ob gemäß optischer Beurteilung eine saubere Schnittkante für eine Materiallage und für 8 Materiallagen möglich ist.



Abbildung 37: Ideal-Schneidemaschine mit Materialprobe aus 100% Cellulosefasern

### Schneid- und Rillversuche mit dem Plotter Zünd ProCut 2500L

Mit dem Plotter Zünd ProCut 2500 L wurden weitere Schneidversuche, sowie Perforier- und Rillversuche durchgeführt. Mithilfe einer Software können die unterschiedlichen Linientypen, d.h. die Schneid-, Rill- und Perforierlinien, den einzelnen Werkzeugen des Plotters zugeordnet werden. Die Werkzeuge können in X- und Y-Richtung verfahren und sich um die eigene Achse drehen. Somit können runde, geradlinige Formen und grundsätzlich auch Freiformen von den Werkzeugen abgefahren werden. Es wurden CAD-Daten erstellt, die Schneid-, Rill- und Perforierlinien enthalten. Die CAD-Daten erzeugen auf dem Plotter eine Testform mit geradlinigen Schneid-, Rill- und Perforierlinien, sowie eine zusätzliche kreisrunde Schneidlinie.



Abbildung 38: Erzeugen der Testform mithilfe des Plotters

Die enthaltenen Schneidlinien dienen zum Testen der Schnittkanten bei runden und geradlinigen Schnitten unter Einsatz von a) des oszillierenden Messers und b) des Ziehmessers. Es wurden für die 4 Prüfmaterialien jeweils Testformen unter Einsatz des oszillierenden Messers sowie des Ziehmessers geplottet.

Die Testformen enthalten 4 Laschen, die unterschiedlichen Prüfzwecken dienen:

- Lasche 1: Faltbarkeit des Materials entlang einer Rilllinie im Winkel 45°
- Lasche 2: Faltbarkeit des Materials entlang einer Rilllinie im Winkel 90°
- Lasche 3: Faltbarkeit des Materials entlang einer Rilllinie im Winkel 180°
- Lasche 4: Reißbarkeit des Materials entlang einer Perforierlinie

Die Rilllinien können mit unterschiedlicher Belastung des Rillwerkzeugs auf die Testmaterialien angeedrückt werden. Die Höhe der Belastung wird in kg ausgedrückt. Es wurden Testformen mit einer Belastung von 4 kg, 8 kg und 12 kg erzeugt.

Als weiterer Faktor wurden zwei unterschiedliche Rillräder mit den Breiten von 0,7 mm und 1,5 mm eingesetzt. Beide Rillräder können bedingt durch ihre Geometrie maximal 1,0 mm in die Materialien eindrücken.

Für die Perforationen wurden ebenfalls zwei unterschiedliche Werkzeuge verwendet. Die 5 mm langen Klingen des ersten Perforationsmesser befinden sich im Abstand von 5 mm auf einem Rad, sodass Perforationslinien mit der wiederkehrenden Abfolge 5 mm Schnitt und 5 mm ohne Schnitt ins Material eingebracht werden können. Das zweite Perforationsmesser erzeugt die wiederkehrende Abfolge 1 mm Schnitt und 1 mm ohne Schnitt.

Versuch Nr.	Schneid-/Prüfgerät	Werkzeug	Prüfung
1	Ideal 5222 Digicut	Guillotine-Messer	Schnittkante Material 1-lagig
2	Ideal 5222 Digicut	Guillotine-Messer	Schnittkante Material 8-lagig
3	Zünd ProCut 2500 L	Ziehmesser	Schnittkante
4	Zünd ProCut 2500 L	Oszillierendes Messer	Schnittkante
5	Zünd ProCut 2500 L	Perforationsmesser 5-5 mm	Reißbarkeit entlang Perfo-Linie
6	Zünd ProCut 2500 L	Perforationsmesser 1-1 mm	Reißbarkeit entlang Perfo-Linie
7	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 0,7 mm	Belastung 4 kg, Faltwinkel 45°
8	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 0,7 mm	Belastung 4 kg, Faltwinkel 90°
9	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 0,7 mm	Belastung 4 kg, Faltwinkel 180°
10	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 1,5 mm	Belastung 4 kg, Faltwinkel 45°
11	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 1,5 mm	Belastung 4 kg, Faltwinkel 90°
12	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 1,5 mm	Belastung 4 kg, Faltwinkel 180°
13	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 0,7 mm	Belastung 8 kg, Faltwinkel 45°
14	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 0,7 mm	Belastung 8 kg, Faltwinkel 90°
15	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 0,7 mm	Belastung 8 kg, Faltwinkel 180°
16	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 1,5 mm	Belastung 8 kg, Faltwinkel 45°
17	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 1,5 mm	Belastung 8 kg, Faltwinkel 90°
18	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 1,5 mm	Belastung 8 kg, Faltwinkel 180°

19	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 0,7 mm	Belastung 12 kg, faltwinkel 45°
20	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 0,7 mm	Belastung 12 kg, faltwinkel 90°
21	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 0,7 mm	Belastung 12 kg, faltwinkel 180°
22	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 1,5 mm	Belastung 12 kg, faltwinkel 45°
23	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 1,5 mm	Belastung 12 kg, faltwinkel 90°
24	Zünd ProCut 2500 L	Rillrad: Breite 1,5 mm	Belastung 12 kg, faltwinkel 180°

Tabelle 10: Versuchsaufbau Schneid- und Rillversuche

### Ergebnisse der Schneid- und Rillversuche

Alle Schneidversuche mit Ausnahme von Versuch Nr. 3 führten zu einem positiven Ergebnis. Mit dem Ziehmesser gelang es bei keinem der 4 getesteten Materialien einen sauberen Schnitt zu erzeugen.

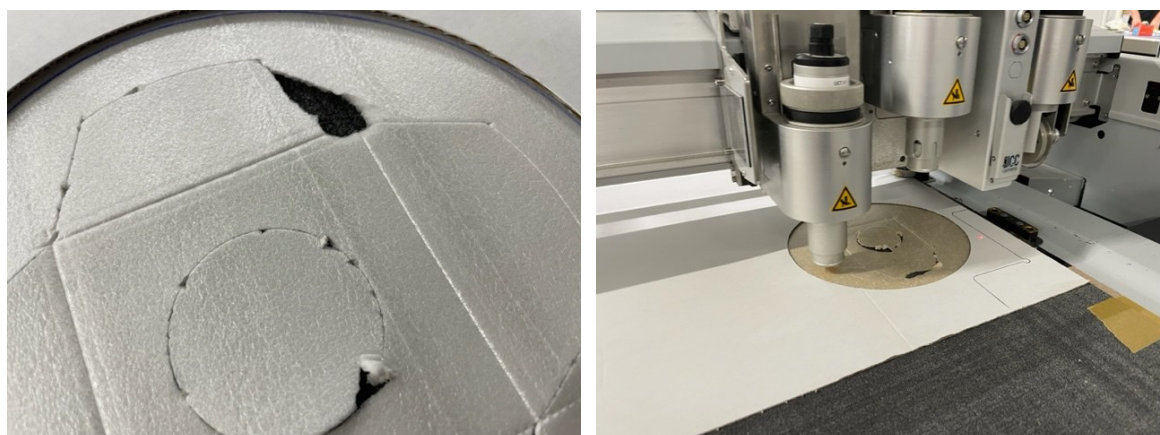


Abbildung 39: Ergebnis Schneidversuch mit Ziehmesser am Beispiel von Route 1

Bei Versuch Nr. 2, d.h. dem durchtrennen von 8 Materiallagen mit dem Guillotine-Messer ist anzumerken, dass die untere Lage trotz anpressen mit Niederhalter bei den Materialien aus Route 1 beim Schneiden verrutschen kann.

Mit beiden Rillrädern ließen sich bei den unterschiedlichen Belastungen mit 4, 8 und 12 kg faltwinkel von 45°, 90° und 180° durchführen, ohne dass es zu einem Aufplatzen der Oberflächenstruktur der 4 Testmaterialien gekommen ist. Die Schäume aus Route 1 haben an den gerillten Laschen höhere Rückstellkräfte im Vergleich zum Material aus Route 4 und der Cellulose-Referenz. Ohne kräftiges Andrücken der faltwinkel bewegen sich die Schäume in richtung 0° Ausgangsposition zurück. Durch festes, entlangstreichendes Andrücken mit finger oder Falzbeil entlang der 180° gefalteten Linie, kann erreicht werden, dass sich geklappte Laschen auf 45° zurückstellen anstatt auf 0°. Das Material aus Route 1 sowie die Cellulose-Referenz stellt sich bei gleicher Vorgehensweise von 180° auf ca. 90° zurück.

Die Perforationslinien ließen sich ebenfalls einbringen. Ein Reißen von Material entlang der Linien kann für alle Materialien mühelos vorgenommen werden. Das Abreißen bei der 1-1 mm Perforation gelingt verglichen mit der 5-5 mm Perforation mit merklich weniger Kraftaufwand und liefert eine saubereres Rissbild.

### Fazit zu den Schneid-, Rill- und Perforationsversuchen

Es wurden 4 Materialien jeweils 24 Versuchen unterzogen, sodass insgesamt 96 Tests durchgeführt wurden. 92 von 96 Tests konnten erfolgreich abgeschlossen werden, wodurch die Materialien in Bezug auf Schneidbarkeit, faltbarkeit und der händischen Vereinzelbarkeit von zusammenhängenden Produkten mithilfe von Perforationen als gut weiterverarbeitbar eingestuft werden können. Das Schneiden mit Ziehmesser war nicht erfolgreich. Bei industrieller Verarbeitung könnten Niederhalter beim Schneiden unterstützen. Die Schärfe der Klinge kann entscheidend sein. Als Alternative zu Ziehmessern wäre es für die industrielle Verarbeitung ratsam Kreismesser einzusetzen um Längsschnitte zu erzeugen.

## 3.5 Verpackungsentwicklung (AP 4)

(Mainteam GmbH)

### 3.5.1 Design und Technische Zeichnung der Verpackungskonstruktion

Auf Basis von Marktmonitoring und Wettbewerbsanalyse (Arbeitspaket 6.1) wurden Ideen generiert, die durch Skizzen visualisiert werden konnten (vgl. Abbildung). Im Projektverlauf wurden die Ideen immer weiter konkretisiert und anhand von technischen Zeichnungen für die Visualisierung in Form von 3D-Renderings vorbereitet.

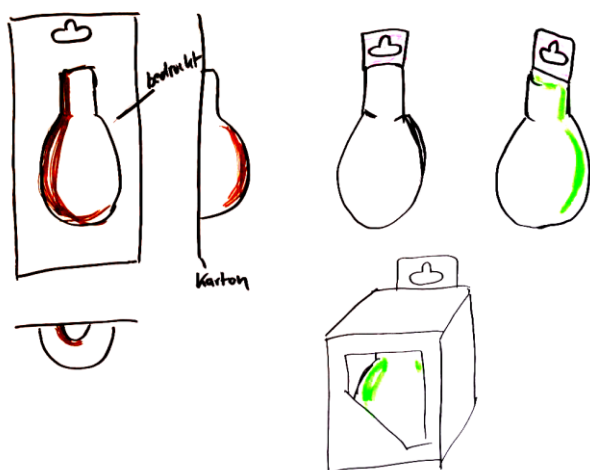


Abbildung 40: Skizziertes Design am Beispiel einer Glühbirnenverpackung

In der frühen Projektphase wurden vorläufige Darstellungen gezeichnet und bereits in eine dreidimensionale Ansicht gewandelt.



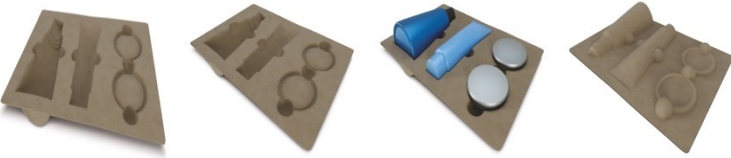






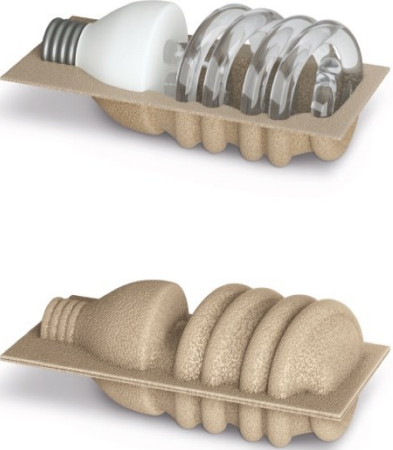










Entwurf	Vorläufige Darstellungen
Verpackung Glühbirne	
Verpackung Kabel	
Verpackung Kosmetik	
Schale länglich	
Schale rund	
Teller Früchte	

Abbildung 41: Erste 3D-generierte Darstellungen von Verpackungsentwürfen

#### 4.2 3D-Visualisierung und funktionale Darstellung der Verpackungen

Durch den Austausch innerhalb des Projektkonsortiums wurden vorhandene Ideen verfeinert und neue Vorschläge kreiert und mittels 3D-Renderings in Visualisierungen inklusive funktionaler Darstellung umgesetzt. Dadurch entstand ein Portfolio an Verpackungskonstruktionen, aus dem eine Auswahl für die Entwicklung von Demonstratoren (Arbeitspaket 5) vorgenommen werden konnte. Die Vorschläge umfassen ein Spektrum an Verpackungen für unterschiedliche Märkte, wie Lebensmittel-, Elektro-, und Konsumgüterindustrie.

Vorschlag	Visualisierung der Verpackung	Funktionale Darstellung
1		
		

3		
4		
5		
6		
7		

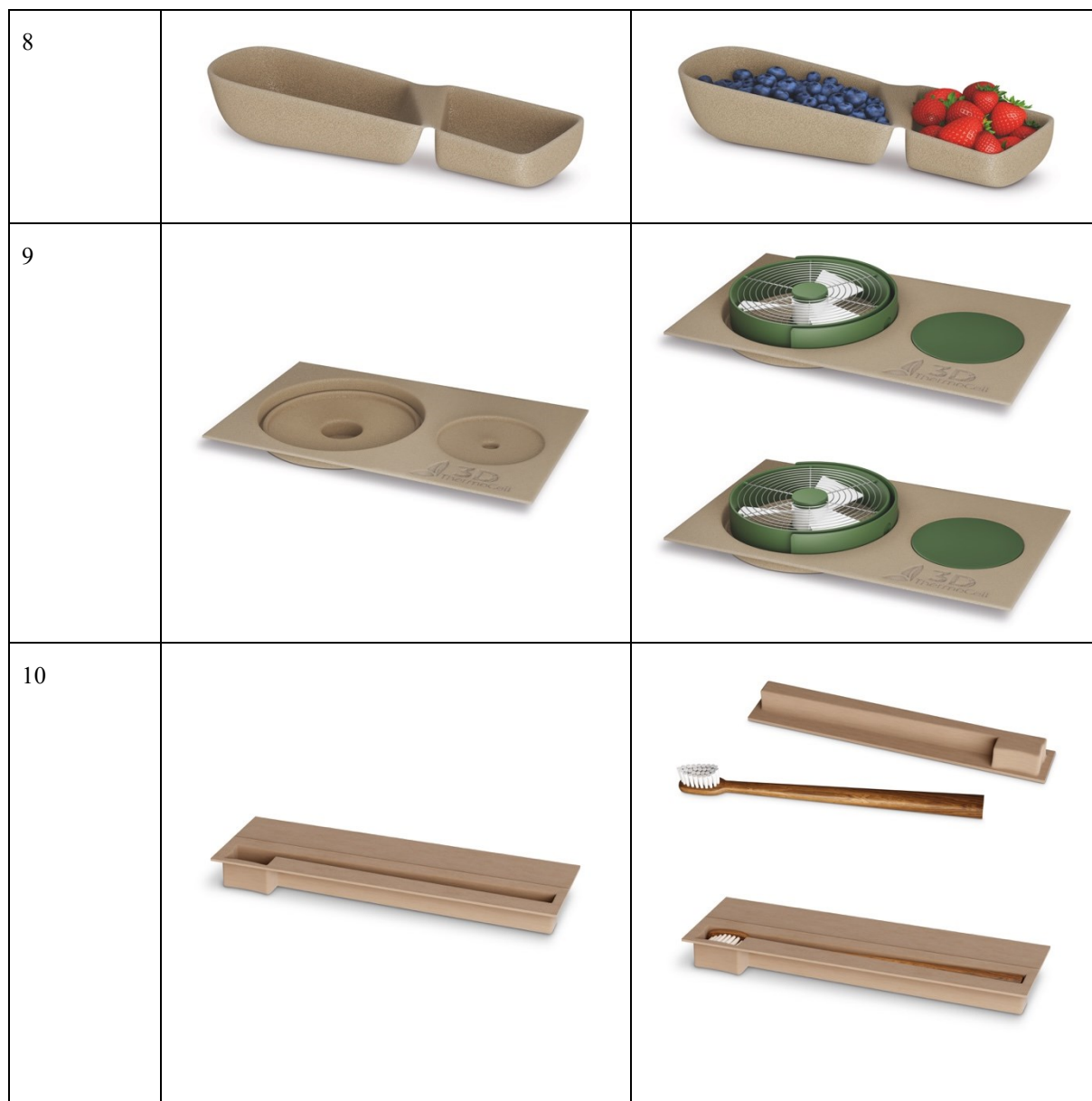


Abbildung 42: Visualisierung und funktionale Darstellung der Verpackungskonstruktionen

### 3.6 Demonstratoren-Entwicklung (AP 5)

(Mack GmbH)

#### 3.6.1 Demonstrator Route 1

Die Demonstratorentwicklung für Route 1 basiert auf den Materialeigenschaften, der compoundingen und geschäumten Platten, sowie der Marktanalyse der Firma Mainteam.

Die Ergebnisse der Marktanalyse von Mainteam wurden bei der Firma Mack ausgewertet, auf Machbarkeit geprüft, sowie die Wirtschaftlichkeit analysiert.

Als Demonstratoren für diese Route wurden eine Batterie Verpackung, eine Memory-Verpackung, eine Weinglas-Verpackung sowie eine Obstschale ausgewählt.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden die entsprechenden Formen festgelegt, CAD-Daten der zu verpackenden Teile erstellt oder in Auftrag gegeben sowie die ersten Werkzeugkonstruktionen erstellt.

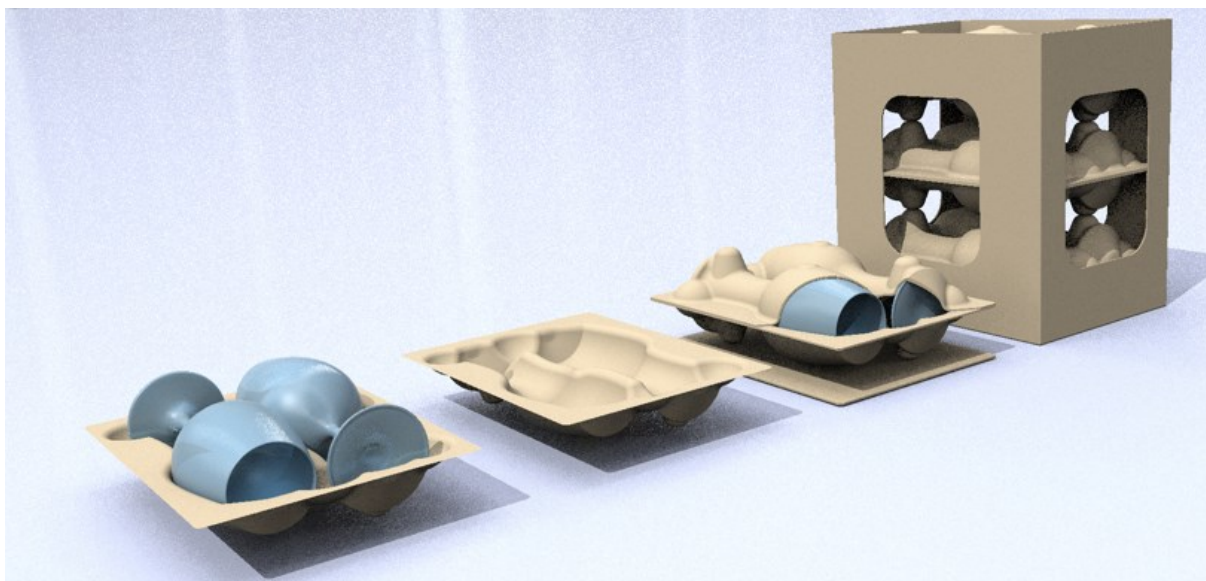


Abbildung 43: Rendering Weinglas-Verpackung (Söhngen Design)

Die Verpackung zum Schutz der Weingläser ist in Bezug auf Geometrie und Schwierigkeitsgrad sehr weit oben einzusiedeln. Der Verzug im Bereich der Innenradien zwischen den Weingläsern beträgt über 100 %. Daher können bei dieser Form alle Parameter für ein besseres Fließverhalten ermittelt werden.

Diese ersten Entwürfe wurden aufgrund der Materialeigenschaften in Bezug auf Radien und Verzug optimiert.

Nach der Freigabe ist eine komplette Werkzeugkonstruktion inkl. Oberstempel und Grundplattenfestlegung erstellt worden inklusive Überprüfung der Stapelbarkeit.

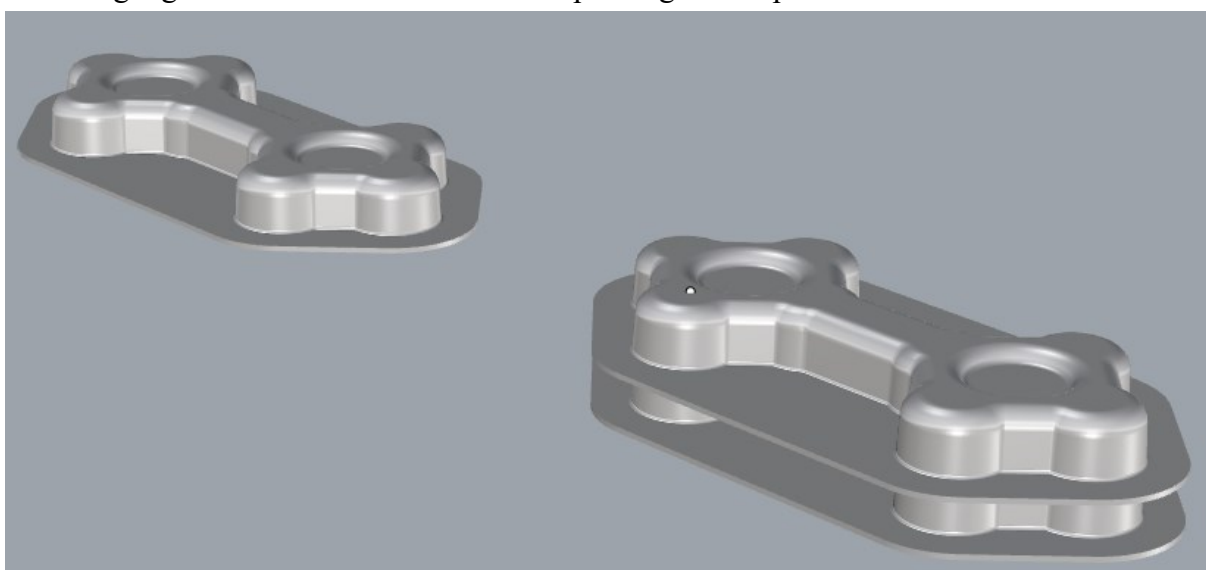


Abbildung 44: Alu-Werkzeug zur Herstellung einer Memoryverpackung, Konstruktionszeichnung

Für die Oberstempelführung wurden die Werkzeuge inkl. Oberstempel um Flächen ergänzt, damit diese eine Führung haben, in einem Bereich außerhalb des Bauteils, wo das Papier abgesichert werden kann und eine perfekte Passung für das Bauteil gesichert wird.



Abbildung 45: Thermoform-Werkzeug Memory-Verpackung, Montage der Oberstempel



Abbildung 46: Thermoformwerkzeug Batterie-Verpackung



Abbildung 47: Thermoformwerkzeug Weinglas-Verpackung

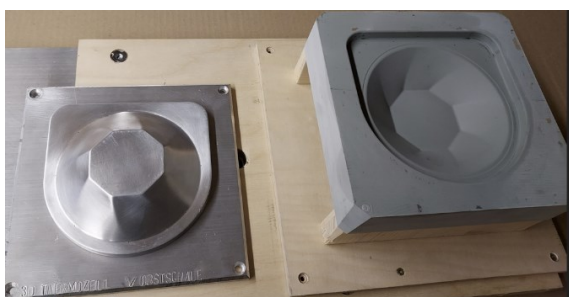


Abbildung 48: Thermoformwerkzeug Schale



Abbildung 49: Demonstrator Memory-Verpackung aus CP mit Jelupulver



Abbildung 50: Demonstrator Batterie-Verpackung aus CP mit Jelupulver

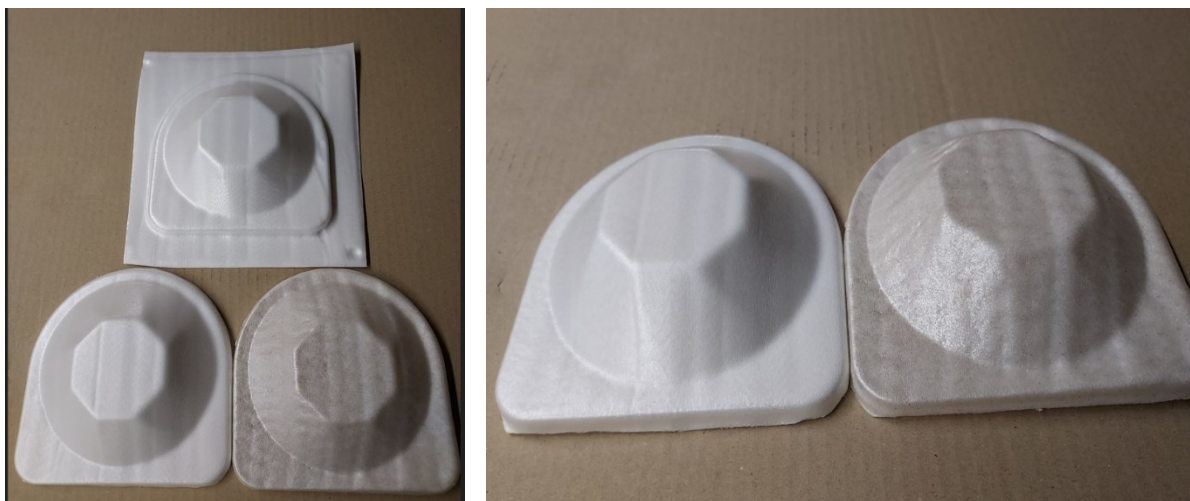


Abbildung 51: Demonstrator Schale aus CP-Jelufasern



Abbildung 52: Demonstrator Weingläser-Verpackung aus CP und Jelupulver

### 3.6.2 Demonstrator Route 4

Die Demonstratorentwicklung für Route 4 ist limitiert durch das Format des Papierhalbzeuges und die begrenzte Dehnung des Materials.

Hier konnte die Umformung auf der kleinsten Industrieanlage mit einem Fenstermaß von 250x250 mm durchgeführt werden.

Dafür mussten die Papierproben außerhalb des Ziehfensters verarbeitet werden. Zur Umformung mit den vorhandenen Spannrahmen wurden diese auf Kartons mit einer runden Aussparung aufgeklebt.

Die Versuche fanden damit auch auf der Anlage Illig UA100 4G mit Oberstempel statt.

Ausschlaggebend für die Demonstrator Auswahl in Route 4 war die Verzugsfähigkeit des Materials, welche an den Proben bei ICT / DHBW analysiert wurde.

Auch höhere Umformgrade wurden getestet, konnten jedoch nicht nachgewiesen werden. Folglich wurde die Schale als Demonstrator für Route 4 ausgewählt, siehe folgende Bilder.

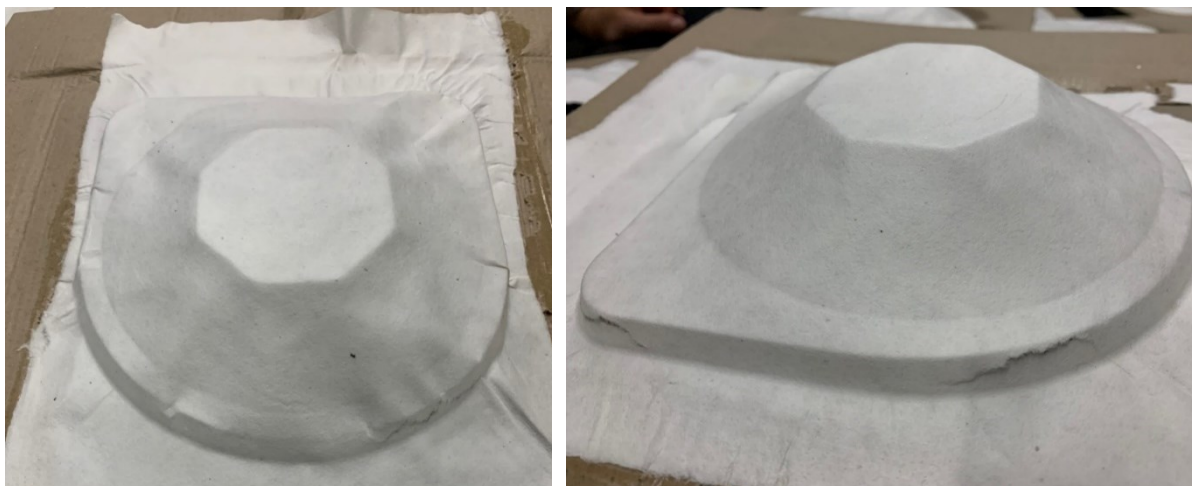


Abbildung 53: Umgeformte Schale aus Chitosan-Papier, Bild 1

### 3.7 Bilanzierung und wirtschaftliche Verwertung (AP 6)

#### 3.7.1 Projektbegleitendes Marktmonitoring und Wettbewerbsanalyse

(Mainteam GmbH) - Marktmonitoring und Wettbewerbsanalyse sind in einem separaten eigenständigen Dokument (Anhang) dargestellt. Der Anhang kann aus rechtlichen und vertraulichen Gründen nicht veröffentlicht werden

#### 3.7.2 Ganzheitliche Bilanzierung

(DHBW Karlsruhe)

Eine ganzheitliche Bilanzierung im Sinne einer Ökobilanzierung (z.B. nach ISO 14040/14044) kann im Rahmen des durchgeführten Projektes nicht durchgeführt werden. U.a. fehlen bei der Sachbilanzierung zur geforderten Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes die entsprechenden Datengrundlagen für stoffspezifische Eigenschaften.

Um dennoch eine ganzheitliche Bilanzierung vorzunehmen, erscheint die Verwendung einer qualitativen Bewertung oder semiquantitativer Methode sinnvoll, um zumindest eine zahlenbasierte Einschätzung der gewählten Produktwege ausüben zu können. Hier bietet sich die Anwendung eines Scoring Verfahrens, z.B. die sogenannte Nutzwertanalyse an. Üblicherweise genutzt zur Unterstützung komplexer Entscheidungsfindungen, kann die Nutzwertanalyse auch grundsätzlich zur Bewertung von Optionen hinsichtlich Eignung auf bestimmte Anwendungsfelder verwendet werden.

Zur ganzheitlichen Bilanzierung der 3 Lösungen im Projekt werden diese anhand von ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Gesichtspunkten, also den drei Säulen der Nachhaltigkeit, verglichen.

Als Referenz wird eine Schale aus konventionellem Polyethylenterephthalat (PET) genommen, die generell durch die erarbeiteten Lösungen ersetzt werden könnte. PET findet sich oft im Take-Away-Bereich und als Einleger, zum Beispiel in Faltschachteln. Eine weitere Referenz ist eine Fasergusschale. Diese wird auch oft im Take-Away-Segment verwendet.

Da eine konkrete quantitative Bewertung nicht möglich ist, werden die verschiedenen Kriterien auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet. Da es mit einer kleineren Skala meist leichter ist die Bewertung nachzuvollziehen, wird diese so verwendet.

1	Kriterium nicht erfüllt
2	Kriterium eher nicht erfüllt
3	Kriterium teilweise erfüllt
4	Kriterium fast voll erfüllt
5	Kriterium voll erfüllt

Aus ökonomischer Sicht werden die Kosten des Materials, die Zykluszeiten bei der Herstellung und der Herstellungsaufwand betrachtet.

Aus ökologischer Sicht wird das Gewicht der Verpackung, ökobilanzielle Indikatoren, Biobasiertheit und Recyclingfähigkeit betrachtet.<sup>9</sup>

Gesellschaftliche Gesichtspunkte, die berücksichtigt werden, sind die Markakzeptanz beim Kunden und gesetzliche Regelungen.

Die Bewertung wird von der DHBW durchgeführt, da diese die Projektleitung innehatte und damit den Gesamtüberblick bieten kann. Zu einzelnen Kriterien werden die Projektpartner nach ihrer Einschätzung und Expertise befragt.

Eine Wertung der Kriterien und der 3 Säulen findet nicht statt. Alle drei Säulen werden gleichberechtigt bewertet. Eine Wertung wäre möglich, würde aber nur auf subjektiven Gründen basieren und wird deshalb nicht durchgeführt.

### 3.7.2.1 Ökonomische Betrachtung

Aufbauend auf dem wirtschaftlichen Verwertungsplan im folgenden Kapitel, wird hier die Bilanzierung vorgenommen.

Betrachtet man die reinen Materialpreise, sind Fasergusschalen am günstigsten, da diese aus Altpapier hergestellt werden. Gleich danach kommen Papiere mit Chitosan, die preislich auch sehr niedrig liegen. Erheblich teurer ist PET, und die Lösungen aus Route 1 liegen noch darüber.

Zu einer Bewertung werden hier die Punkte als Vergleich gegeben. Faserguss als günstigstes Material erhält die Bewertung 5, Chitosanpapiere 4, PET 3 Punkte und die beiden CP-Lösungen jeweils 2 Punkte.

<sup>9</sup> (Nowack, 2007)

Die Zykluszeiten bauen zusätzlich zum wirtschaftlichen Verwertungsplan auf den Erkenntnissen der Thermoformversuche im Technikums- und Industriemaßstab auf. Zur Herstellung von Fasergußverpackungen wird relativ viel Energie und Zeit benötigt (= 1 Punkt). Auch die Umformung von Papieren mit Chitosan ist energie- und zeitaufwändiger als herkömmliches Thermoformen, da Feuchtigkeit benötigt wird, die dann wieder herausgetrocknet werden muss (=2 Punkte).

Das Thermoformen von PET ist mit kurzen Taktzeiten möglich (= 5 Punkte). CP lässt sich ähnlich gut umformen, es wird nur eine geringfügig höhere Aufheizzeit benötigt (= 4 Punkte).

Auch der Herstellungsaufwand wird nur vergleichend betrachtet. Aufgrund des Faktors zur Verarbeitung der Halbfertigware zur Form (siehe folgendes Kapitel) werden die Punkte wie folgt vergeben: CP und PET jeweils 5 Punkte, Papiere mit Chitosan 3 Punkte und Fasergußverpackungen einen Punkt.

### 3.7.2.2 Ökologische Betrachtung

Eine genaue ökobilanzielle Betrachtung erscheint hier aus mehreren Gründen nicht sinnvoll: eine ausführliche und korrekt durchgeführte Ökobilanz dauert sehr lange und ist sehr aufwändig. Insbesondere die nach ISO 14040 geforderte medien- und stoffstromübergreifende Betrachtung kann mit den in diesem Projekt zur Verfügung stehenden Daten nicht ausreichend durchgeführt werden. Deshalb wird in dieser Arbeit auf einzelne schon vorhandene Ökobilanzen aufgebaut und daraus eine qualitative Aussage getroffen.

Route 1, in der Cellulosepropionat verwendet wird, ist aufgrund der geringen Datenlage schwer zu vergleichen. Hier werden Vergleiche von konventionellen mit biobasierten Kunststoffen hinzugezogen, die vergleichbar sind. In der vorliegenden Untersuchung werden Getränkebecher aus PP, PET und PLA verglichen. Dabei hat PLA den geringsten CO<sub>2</sub>-Ausstoß und Energieaufwand über den gesamten Lebenszyklus hinweg.<sup>10</sup>

Bei den vorliegenden Verpackungen aus CP, die geschäumt werden, kann von einer ebenso guten oder besseren Bilanz ausgegangen werden. Durch das Schäumen wird der Materialeinsatz reduziert, bei gleichzeitiger Beibehaltung der Stabilität.

In einer Ökobilanz des ifeus (Institut für Energie- und Umweltforschung) werden verschiedene Lebensmittelverpackungen verglichen: konventionelle Verpackungen aus PET, Fasergußverpackungen und beschichtete Papierverpackungen.

In allen Kategorien Klimawandel, Ressourcenverbrauch und Schadstoffemissionen schneidet die PET-Schale am schlechtesten ab. Die Fasergußschale liefert aufgrund ihres hohen Gewichtes auch schlechtere Ergebnisse. Die beschichtete Papierschale, die am ehesten der Lösung 4, der Papiere mit Chitosan entspricht, hat den geringsten Einfluss auf die Umwelt.<sup>11</sup>

Daher wird die Höchstpunktzahl an die Verpackungen aus Papier und CP vergeben. Die PET-Schale erreicht die schlechteste Punktzahl, die Fasergußschale wird zwischen den anderen Lösungen mit 3 Punkten bewertet.

---

<sup>10</sup> (NatureWorks, 2023)

<sup>11</sup> (Kauertz, 2021)

Bewertet man den Ursprung der Materialien, sind die Lösungen aus CP und Papier, sowie die Fasergusschale biobasiert und damit aus erneuerbaren Quellen. Dafür werden diese mit 5 Punkten bewertet.

PET ist ein konventioneller Rohstoff und damit nicht biobasiert, und erhält somit die geringste Bewertung.

Betrachtet man die Recyclingfähigkeit ist lediglich die Fasergussverpackung problemlos im Papierstrom recyclingfähig (siehe Kapitel Recyclingfähigkeit oben). Auch die PET-Verpackung ist in Deutschland nicht als recyclingfähig einzustufen.<sup>12</sup>

Damit erreicht die Fasergussverpackung 5 Punkte, die anderen Verpackungen einen Punkt.

### 3.7.2.3 Gesellschaftliche Faktoren

In der Öffentlichkeit betrachten die Konsumenten Verpackungen oft auch emotional und nicht immer faktenorientiert. Ein Großteil gibt dennoch an, dass sie ihre Entscheidungen anhand der Recyclingfähigkeit trifft, auch wenn sie diese nicht immer richtig einschätzen können.<sup>13</sup>

Auch die wahrgenommene Nachhaltigkeit beeinflusst die Kaufentscheidung. Dabei werden Papierverpackungen gegenüber Kunststoffverpackungen bevorzugt,<sup>14</sup>

Wie Konsumenten Verpackungen aus CP wahrnehmen, ist unterschiedlich. Da es ein neues Material im Verpackungsmarkt ist, gibt es damit keine Erfahrungen. CP mit Rettenmaier-Fasern mutet eher natürlich an, da die braunen Fasern im Polymer ein natürliches Aussehen haben. Die Verpackungen aus CP mit Cellulosepulver hat eine Perlmutterfärbung, und sieht damit weniger wie Papier aus.

Damit werden Verpackungen aus Papier am besten bewertet. Die Lösung aus CP mit Rettenmaier-Fasern erhält 4 Punkte, die Lösung mit Cellulosefasern 3. PET schneidet am schlechtesten ab, mit einem Punkt.

Wie der Handel verschiedenen Materialien bewertet, kann anhand der Strategien der großen Handelsketten betrachtet werden. Bei Lidl gibt es seit einigen Jahren die Plastikstrategie RESET. Dabei sollen bis 2025 20% Kunststoffverpackungen durch Alternativen ersetzt werden.<sup>15</sup>

Auch Aldi hat eine Verpackungsmission aufgestellt, in der der Fokus auf nachhaltigen Verpackungen liegt. Betrachtet man die Verpackungen, die seither bei Aldi auf den Markt gekommen sind, sieht man viele papierbasierte Verpackungen.<sup>16</sup>

Man erkennt hieraus, dass die Bewertung der Konsumenten stark durch die Aktivitäten des Handels beeinflusst werden. Deshalb werden die Verpackungslösungen gleich wie bei der Betrachtung der Konsumenten bewertet.

---

<sup>12</sup> (Verpackungsregister, 2023)

<sup>13</sup> (Umweltdialog, 2021)

<sup>14</sup> (Statista, 2021)

<sup>15</sup> (Lidl, 2023)

<sup>16</sup> (Aldi, 2023)

In Spanien und Großbritannien gibt es seit diesem Jahr bereits eine Kunststoffsteuer, mit der Verpackungen aus konventionellen Kunststoffen sanktioniert werden. Auch in den anderen europäischen Ländern und Deutschland ist dies geplant. Ob auch Kunststoffe aus nachwachsendem Ursprung davon betroffen sein werden, ist noch nicht eindeutig klar.

Schon jetzt sind Einwegkunststoffe in vielen Ländern verboten. Vor diesem Hintergrund wird die Verpackung aus PET mit der niedrigsten Punktzahl bewertet, die Verpackungen aus Papier dagegen mit der höchsten. Da es noch nicht klar ist, wie Verpackungen aus biobasierten Kunststoffen betrachtet werden, werden diese mit der mittleren Punktzahl bewertet.

	Route 1a CP + Cellulosefasern (Rettenmaier)	Route 1b: CP + Cellulosepulver	Route 4: Papier mit Chitosan	Schale aus PET	Faserguss- Schale
<b>Ökonomisch</b>					
Kosten Material	2	2	4	3	5
Zykluszeiten	4	4	2	5	1
Herstellungsaufwand	5	5	3	5	1
<b>SUMME</b>	11	11	9	13	7
<b>Ökologisch</b>					
Ökobilanz Material-herstellung	5	5	5	1	2
Erneuerbar, bzw. biobasiert	5	5	5	1	5
Recyclingfähigkeit	1	1	1	1	5
<b>SUMME</b>	11	11	11	3	12
<b>Gesellschaftlich</b>					
Marktakzeptanz in der Bevölkerung	5	4	5	1	5
Akzeptanz im Handel	5	4	5	1	5
Gesetzliche Regelungen	3	3	5	1	5
<b>SUMME</b>	13	11	15	3	15
<b>GESAMTSUMME</b>	35	33	35	19	34

Tabelle 11: Nutzwertanalyse

## Ergebnis

Betrachtet man die erarbeiteten Lösungen ganzheitlich zeigt sich bei der Bilanzierung keine wesentlichen Unterschiede bei den verschiedenen Verpackungslösungen. Lediglich die PET-Schale, die als Referenz bewertet wurde, schneidet in allen Kategorien am schlechtesten ab.

Zusammenfassend kann man sagen, dass je nach Anwendungsfall entschieden werden kann welche Lösung die passendste ist.

### 3.7.3 Wirtschaftliche Verwertung

*(Mainteam GmbH)*

Die Prozesse zur Herstellung von Halbfertigware über die unterschiedlichen Projektrouten 1 und 4 stellen eine Herausforderung für die Vergleichbarkeit dar. Dennoch lassen sich auf Basis von Marktpreisen Rückschlüsse zur Wirtschaftlichkeit ziehen.

*„Detaillierte Ergebnisse werden aufgrund von Vertraulichkeit nicht veröffentlicht“*

### 3.7.4 Marketingkonzept und Verwertungsplan

#### 3.7.4.1 Marketingziele

Einen entscheidenden Einfluss auf die Ausgestaltung des Marketingkonzepts haben die Zielpreise für die entwickelten Materialien. Dieser Punkt wurde mit der ganzheitlichen Bilanzierung (Arbeitspaket 6.2) bestimmt. Es handelt sich um Zielpreise, die erst mit einem hohen Marktanteil der Materialien erreicht werden können, wofür eine Marketingstrategie des Aufholens eingeschlagen werden muss. Allerdings haben die entwickelten Materialien das Potenzial eine wirtschaftliche Alternative für Marktbereiche zu bieten.

*„Detaillierte Ergebnisse werden aufgrund von Vertraulichkeit nicht veröffentlicht“*

#### 3.7.4.2 Verwertungsstrategie

Bislang gibt es kaum Materialien, die auf Cellulose basieren und durch Thermoformen signifikante Tiefziehgrade erreichen. Die Materialien aus Route 1 und 4 positionieren sich exakt in dieser wenig besetzten Nische. Aus technischer Sicht sind die Materialien aus Route 1 für komplexere Produkte und für eine insgesamt weitere Bandbreite geeignet. Das Material aus Route 4 eignet sich für simple und günstige Produkte.

Die Besonderheit aller drei im Projekt entwickelten Materialien ist die Nutzbarkeit in der kunststoffverarbeitenden Industrie. Cellulosehaltige Materialien sind in der Kunststoffindustrie bislang noch Ausnahmereischeinungen. Die Recyclingfähigkeit der Materialien konnte noch nicht nachgewiesen werden, weshalb dieser Punkt hinsichtlich der ökologischen Vorteile nicht werblich verwendet werden kann. Durch das Zurückgreifen auf erneuerbare bzw. biobasierte Rohstoffe bieten sich dennoch ökologische Vorzüge. Zudem wird, aufgrund der gewählten Rohmaterialien und der nutzbaren Fertigungswege, auf eine vorteilhafte Ökobilanz im Vergleich zu den Referenzen aus PET und Faserguss geschlossen.

Im Marketing gilt der Ausdruck „Das Auge isst mit“ in besonderem Maße. Das Material aus CP-Schaum (Route 1) mit Rettenmaier-Cellulosefasern hat eine bräunliche Optik, das den Umweltgedanken unterstreicht. Der CP-Schaum mit Cellulosepulver (Jelu) hat eine Perlmutterartige

Färbung und somit eine edlere Anmutung. Das Papier mit Chitosan ist weiß und bietet somit die Möglichkeit sich von den gräulichen und mit Schmutzeinschlüssen behafteten Fasergussprodukten aus Altpapier zu differenzieren.

	<b>Route 1a</b> <b>CP + Cellulosefasern (Rettenmaier)</b>	<b>Route 1b</b> <b>CP + Cellulosepulver</b>	<b>Route 4</b> <b>Papier mit Chitosan</b>
Primärkunden	Hersteller Schaumfolien	Hersteller Schaumfolien	Papiererzeuger
Sekundärkunden	Kunststoffverarbeiter	Kunststoffverarbeiter	Kunststoffverarbeiter
Herstellkosten	Mittleres Preisniveau	Höheres Preisniveau	Niedriges Preisniveau
Umwelt	Nachwachsende Rohstoffe	Nachwachsende Rohstoffe	Nachwachsende Rohstoffe
Optik	Bräunlich, natürlich	Perlmutter, hochwertig	Weiß, unverschmutzt
<b>Positionierung mit Alleinstellungsmerkmal</b>	Neue Materialklasse auf Cellulosebasis, die in der Kunststoffindustrie genutzt werden kann, mit ökologisch vorteilhafter Ausrichtung. Die natürlich-bräunliche Farbe unterstreicht den Umweltgedanken.	Neue Materialklasse auf Cellulosebasis, die in der Kunststoffindustrie genutzt werden kann, mit ökologisch vorteilhafter Ausrichtung. Die hochwertig anmutende weiße Perlmutteroptik ist für edle Produktverpackung geeignet.	Neue Materialklasse auf Cellulosebasis, die in der Kunststoffindustrie genutzt werden kann, mit ökologisch vorteilhafter Ausrichtung. In der Herstellung wird Papierindustrie mit Weiterverarbeitung in der Kunststoffindustrie zusammengeführt. Die weiße Materialfarbe differenziert sich von der gräulich, schmutzigeren Alternative aus Altpapier-Faserguss

Tabelle 12: Strategische Positionierung für die entwickelten Produkte im Markt

### 3.7.4.3 Marketinginstrumente zur Verwertung

Die Marketinginstrumente, die hauptsächlich betrachtet werden, sind die geeigneten Vertriebskanäle, das Verkaufspreisniveau sowie die Art und Weise der Kommunikation.

Geeignete Vertriebskanäle:

Für die Geschäftskundenbeziehung zwischen Unternehmen (B2B) eignen sich als Vertriebskanäle der Direktvertrieb, die Nutzung von Vertriebspartnern oder der Online-Vertrieb. Im Direktvertrieb kann angestrebt werden für Route 1 Schaumfolienhersteller zu lizenzieren, die unter Zahlung einer Gebühr die entwickelten CP-Schäume fertigen dürfen. Für Route 4 könnten Papiererzeuger für die Materialfertigung lizenziert werden. Für das Lizenzmodell müssen potenzielle Lizenznehmer aus der Industrie gefunden und überzeugt werden. Eine Kontaktaufnahme kann über Besuche durch einen technischen Vertrieb erfolgen. Handelsvertreter bzw. Agenten sind ebenfalls geeignet, um das Konzept zu bewerben und zu verkaufen. Darüber hinaus können Websites für treffende Keywords suchmaschinenoptimiert werden. Eine Alternative zur Suchmaschinenoptimierung ist die gesponserte Suchmaschinenwerbung.

### Empfohlenes Verkaufspreisniveau:

Beim empfohlenen Verkaufspreisniveau geht es weniger darum eine exakte Preisempfehlung für die entwickelten Materialien auszusprechen. Vielmehr geht es darum die Positionierung aufzugreifen und sich preislich seitens der Marktperspektive in einem gerechtfertigten Bereich zu platzieren. Grundsätzlich unterliegen die Materialien aus Route 1 und 4 in ihrer Entstehung alle einem ökologisch-wirtschaftlichen Grundgedanken. Aufgrund ihrer individuellen technischen Eigenschaften, Kosten und Optik ergeben sich dennoch individuelle Ausrichtungen und Preisempfehlungen.

	<b>Route 1a CP + Cellulosefasern (Rettenmaier)</b>	<b>Route 1b CP + Cellulosepulver</b>	<b>Route 4 Papier mit Chitosan</b>
<b>Ausrichtung</b>	ÖKOLOGISCH	PREMIUM	ECONOMY
<b>Empfehlung Verkaufspreisniveau</b>	Mittel	Hoch	Niedrig

*Tabelle 13: Strategische Empfehlung des Verkaufspreisniveau*

### Kommunikation:

Um Interessenten für die Produktion der entwickelten Materialien zu werben, eignen sich Veranstaltungen der Branchenverbände aus Kunststoff- und Papierindustrie. Im direkten Gespräch lassen sich am einfachsten Materialien vorstellen, Vorzüge erklären und kritische Fragen beantworten. Zudem erhalten die Vertriebler unmittelbares Feedback darüber, welche Fragen im Markt noch offen sind, sodass Nachregelungsbedarf bei Defiziten bezüglich der Materialien oder in der Kommunikation erkannt werden kann.

Auf kleinen Messen der Verbände, Symposien und Open House Veranstaltungen lassen sich bereits mit niedrigem Werbebudget gezielt geeignete Unternehmen ansprechen.



Abbildung 54: Messestand für Vertriebsgespräche

Mainteam hat die Möglichkeit einen kleinen Messestand zu produzieren. Werbewände und Roll-Up-Banner können designed werden. Es wurden einsatzfähige Pappmöbel, sowie ein Memory-Spiel entwickelt. Das Inlay des Memoryspiels ist in den CP-Schäumen, die in Route 1 entwickelt wurden in Kleinserie verfügbar. Es eignet sich als Messe-Give-Away oder generell als werbliche Mustersendung.



Abbildung 55: Pappmöbel und Memory für kleine Messeveranstaltungen

Ein weiteres kostengünstig zu erzeugendes Give-Away, wäre ein Bausatz für eine Stiftebox. In Verbindung mit Kugelschreibern, könnte die Stiftebox auf dem Schreibtisch der potenziellen Kunden landen, womit man im Alltag in sichtbarer Nähe bleiben würde.

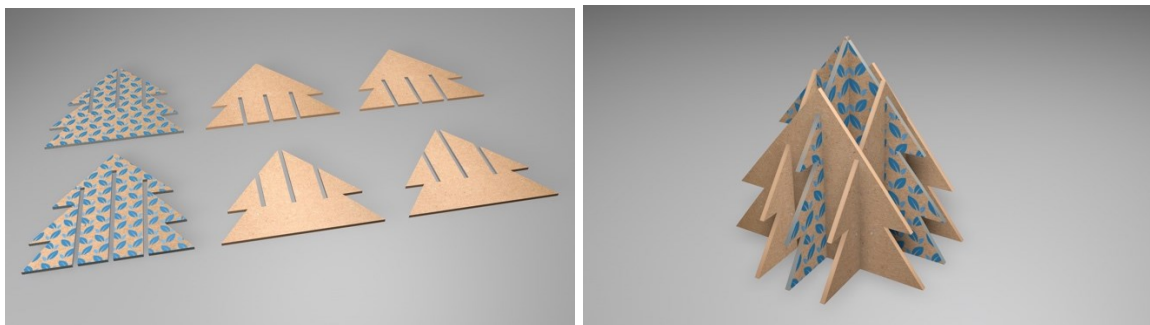


Abbildung 56: Bausatz Stiftebox

Als Ausstattung der Vertriebler zählen vor allem Visitenkarten, um nach dem Erstkontakt als Ansprechpartner weiter im Gespräch bleiben zu können.

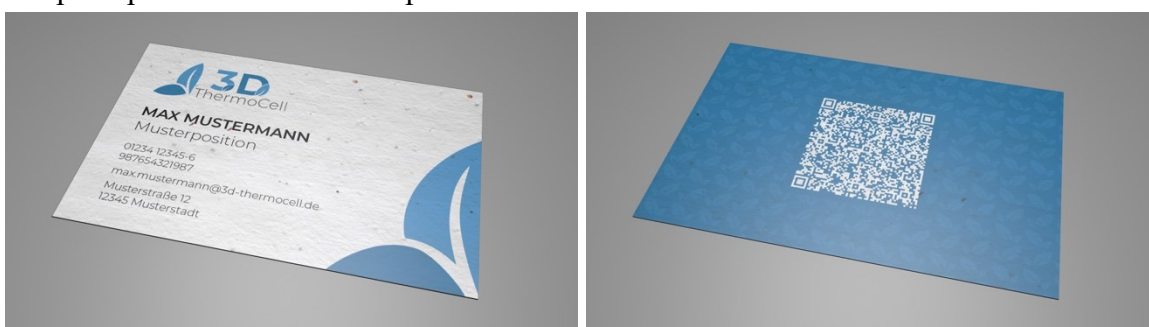


Abbildung 57: Visitenkarten - Basisausstattung für jeden Vertriebler

### Marketingcontrolling:

Ein Geschäftsmodell für ein neues Produkt, das in den Markt eingeführt wird, durchläuft unterschiedliche Lebenszyklusphasen: Die Markteinführung, die Wachstumsphase, eine Sättigungsphase und schließlich kann es eines Tages zum Niedergang des Produktes kommen. Jede dieser Phase benötigt ihre eigene angepasste Marketingstrategie wofür es Kennzahlen zu erheben gilt, um die einzelnen Maßnahmen messbar zu machen.

Die Materialentwicklungen aus Route 1 und 4 befinden sich noch ganz am Beginn einer potenziellen Markteinführung.

*„Detaillierte Ergebnisse werden aufgrund von Vertraulichkeit nicht veröffentlicht“*

## 3.8 Charakterisierung (AP 7)

### 3.8.1 Charakterisierung Halbzeug

#### 3.8.1.1 Charakterisierung Route 4

(DHBW Karlsruhe)

Für die Demonstratoren wurden Halbzeuge / Papiere mit NSBK verwendet. Dabei wurden 100g/m<sup>2</sup> Papiere hergestellt, die mit 6 Gew.-% Chitosan 90/100/A1 additiviert wurden. Chitosan wurde direkt bei der Papierherstellung hinzugegeben (Prozessproben).

Zur Aktivierung des Chitosans wurden die Proben mit 80 ± 5 % Feuchtigkeit mit 3%-iger Säurelösung besprüht und danach getrocknet.

Die Halbzeuge von Route 4 werden anhand von Zugversuchen charakterisiert. Dabei werden einmal die Proben in trockenem Zustand geprüft, und einmal im angefeuchteten Zustand mit ca. 65 Gew.-% H<sub>2</sub>O. Dabei werden die Zugkraft und die Dehnung wie bei der Umformung simuliert.

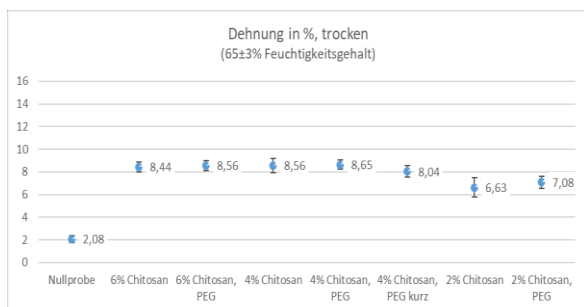


Abbildung 58: Zugversuch Chitosan-Proben, Dehnung in %, trocken

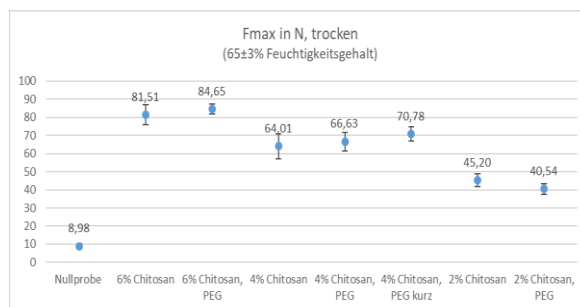


Abbildung 59: Zugversuch Chitosan-Proben, Fmax in N, trocken

In trockenem Zustand wird die Dehnung der Proben vervierfacht im Gegensatz zur Nullprobe. Dabei sieht man keine signifikanten Unterschiede bei den verschiedenen Gehalten an Chitosan. Ebenso wird die Zugkraft sogar um den Faktor 10 erhöht, bei Proben die noch zusätzlich mit PEG behandelt wurden.

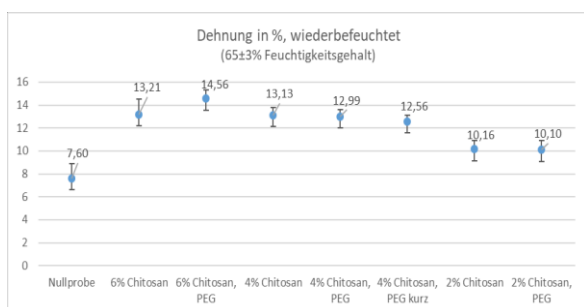


Abbildung 60: Zugversuch Chitosan-Proben, Dehnung in %, wiederbefeuchtet

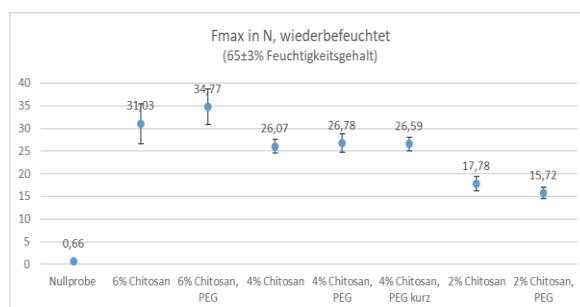


Abbildung 61: Zugversuch Chitosan-Proben, Fmax in N, wiederbefeuchtet

Im feuchten Zustand nimmt die Stabilität herkömmlicher Papiere sehr stark ab. Bei Papieren mit Chitosan, und zusätzlicher Vorbehandlung mit PEG, konnte die Dehnung verdoppelt werden im Vergleich zu Rohpapieren. Die Zugkraft konnte erheblich gesteigert werden,

Durch Chitosan kann also ein viel stärkeres Papier hergestellt werden, bei gleichzeitiger hoher Dehnung.

### 3.8.1.2 Kunststoffcharakterisierung

(Fraunhofer ICT)

#### Rheotens-Messung

Die Rheotens-Messung gibt Aufschluss über die Schmelzeelastizität und -festigkeit von Polymeren. Dabei wird das Polymer aufgeschmolzen und durch eine definierte Düse mit einer definierten Geschwindigkeit gedrückt. Der so erzeugte Schmelzestrang wird im weichen Zustand von zwei gegenläufigen Rädern abgezogen, welche sich relativ zur Schmelzestranggeschwindigkeit beschleunigen. An den Abzugsrädern ist eine Kraftmessdose angebracht, welche die Kraft zum Abziehen des Polymerstranges misst. Diese Kraft aufgetragen gegen die Abzugsgeschwindigkeit gibt Auskunft über die rheologischen Eigenschaften eines Polymers.

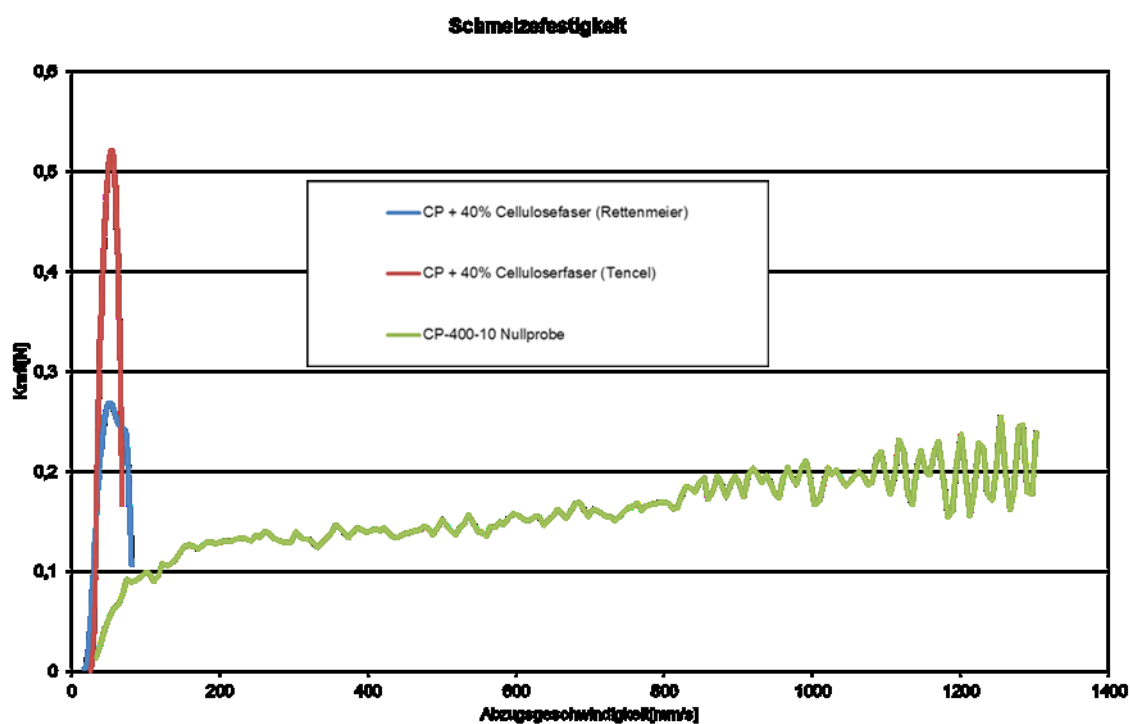


Abbildung 62: Schmelzefestigkeit von CP im Vergleich zu CP-Faser-Compound

#### Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)

Zur Bestimmung der Glasübergänge, Schmelzbereiche und dem Kristallinitätsanteil wurden die ausgewählten Biopolymere mittels DSC charakterisiert. Die Ergebnisse im Folgenden dargestellt.

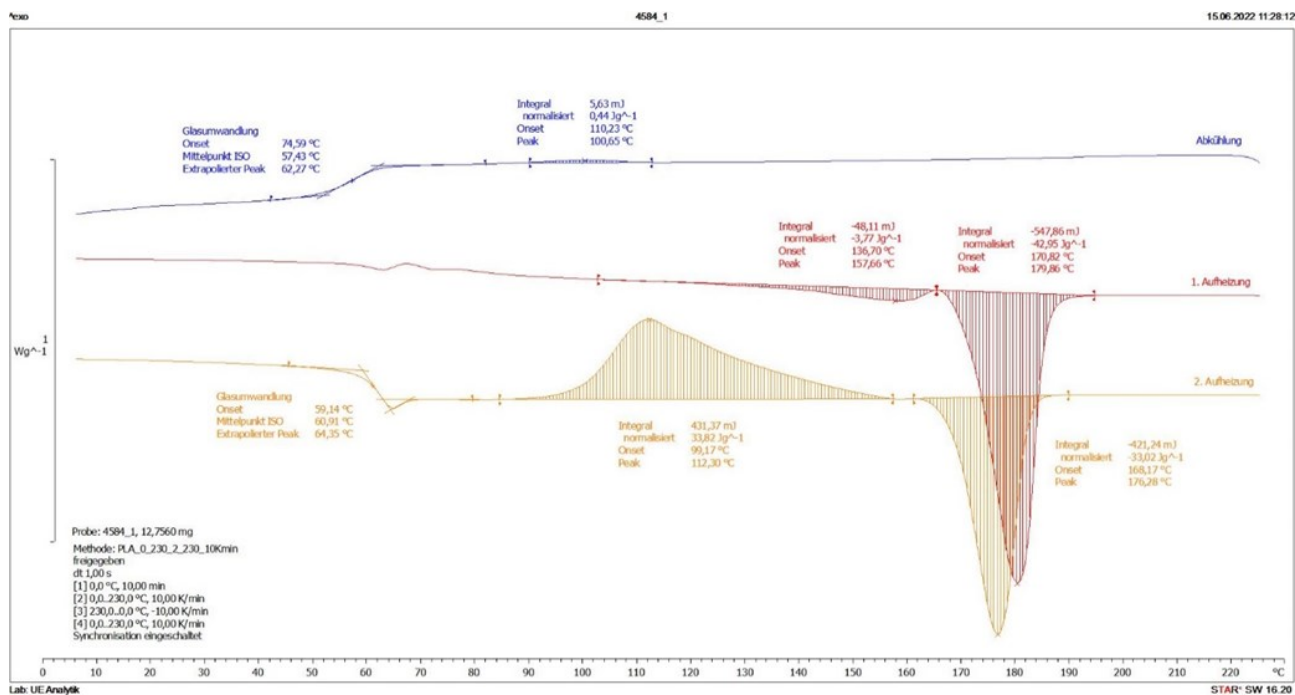


Abbildung 63: DSC teilkristallines PLA

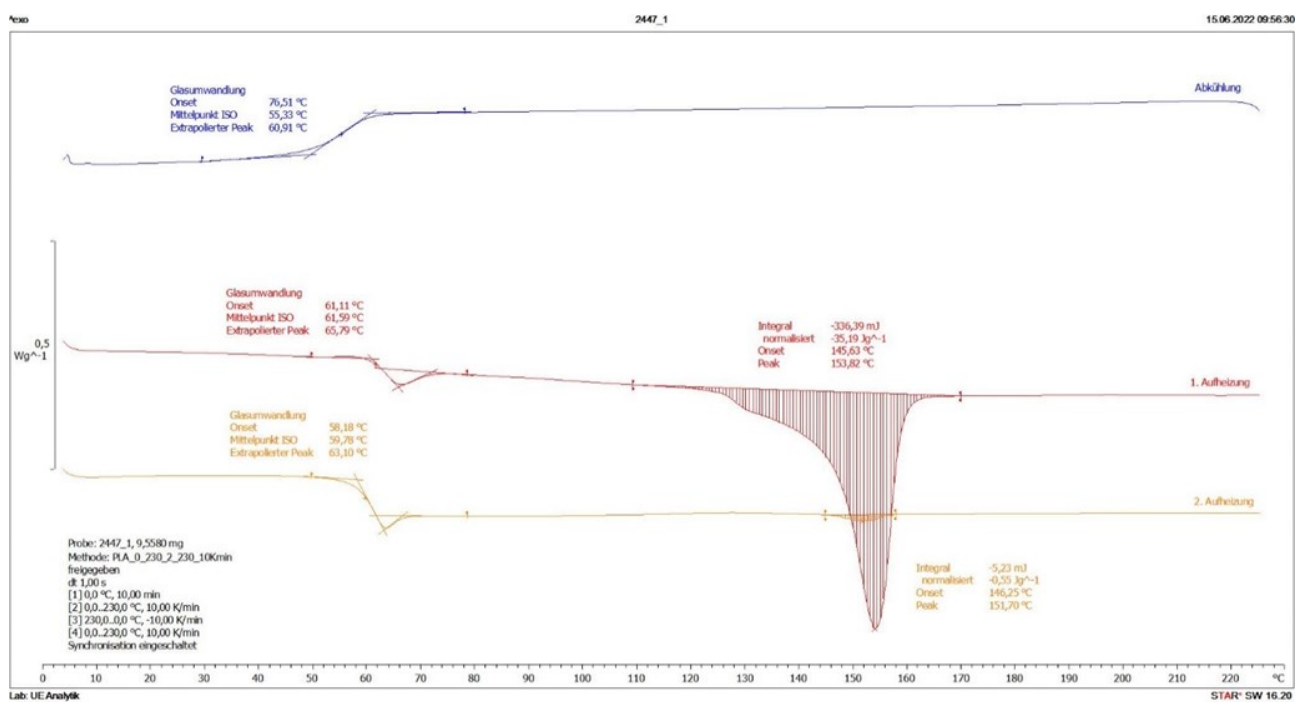


Abbildung 64: DSC amorphes PLA

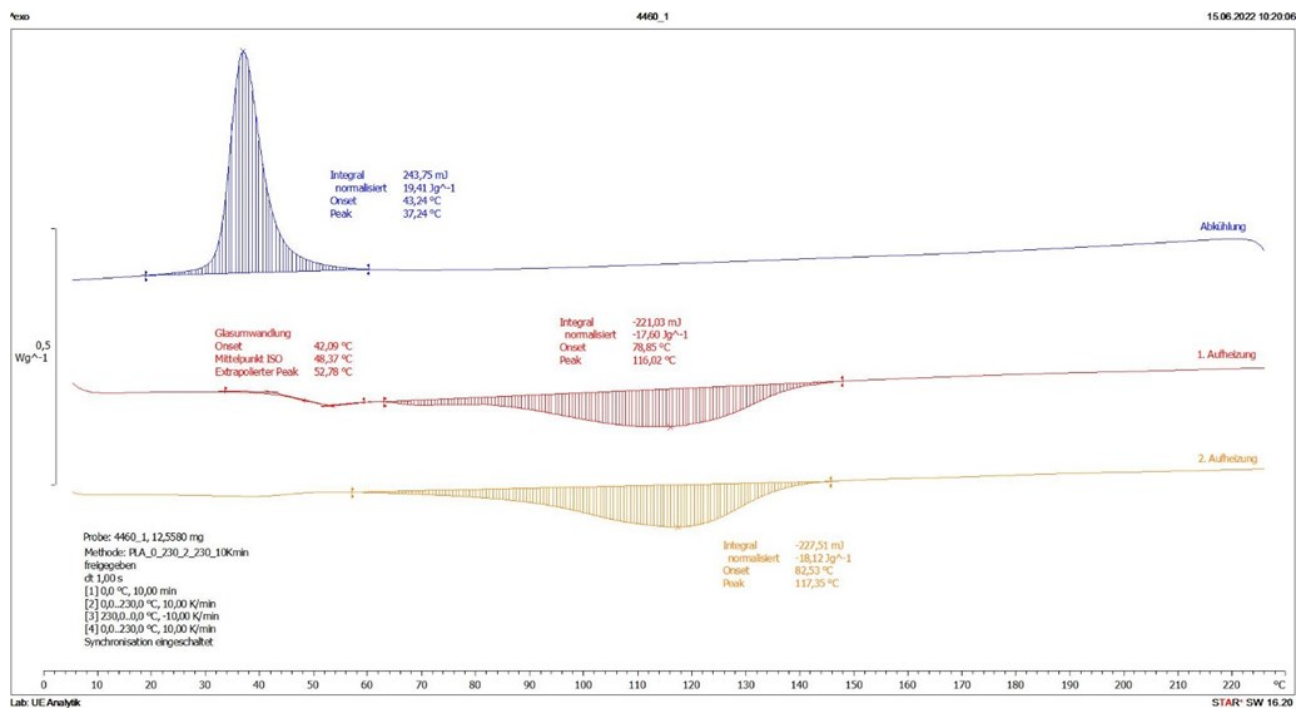


Abbildung 65: DSC PBAT

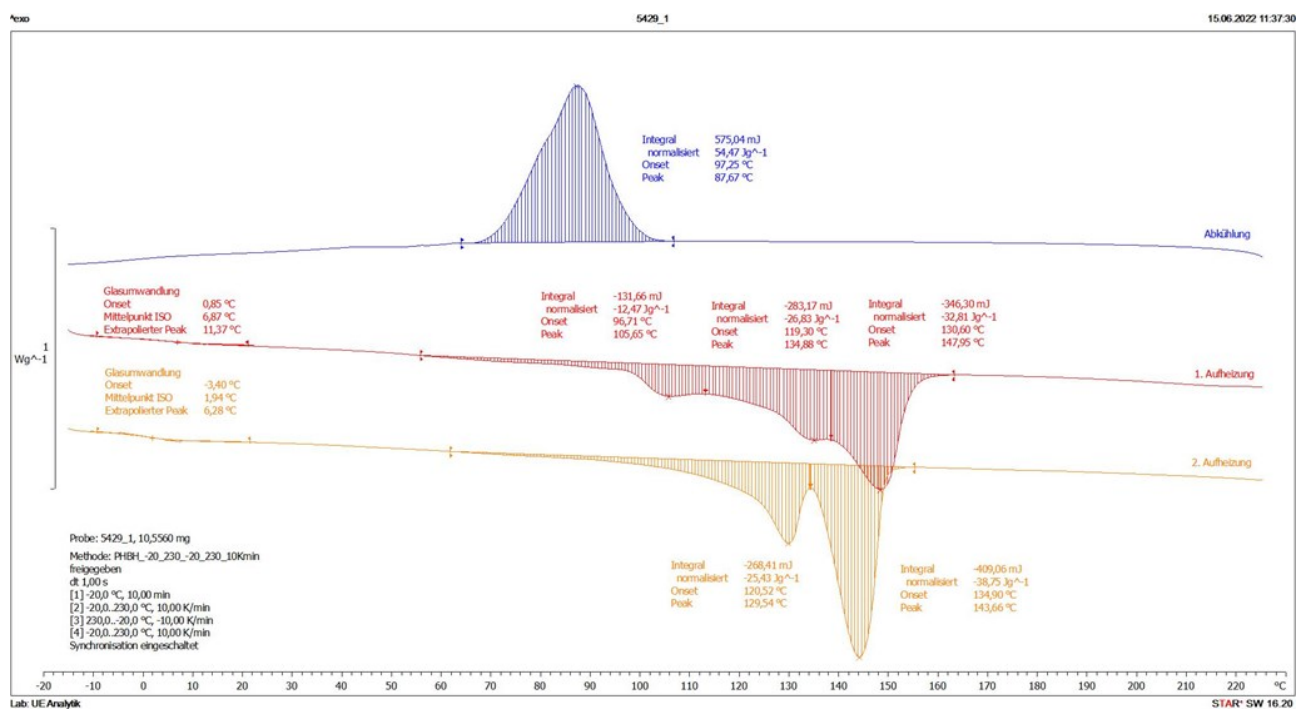


Abbildung 66: DSC PHBH

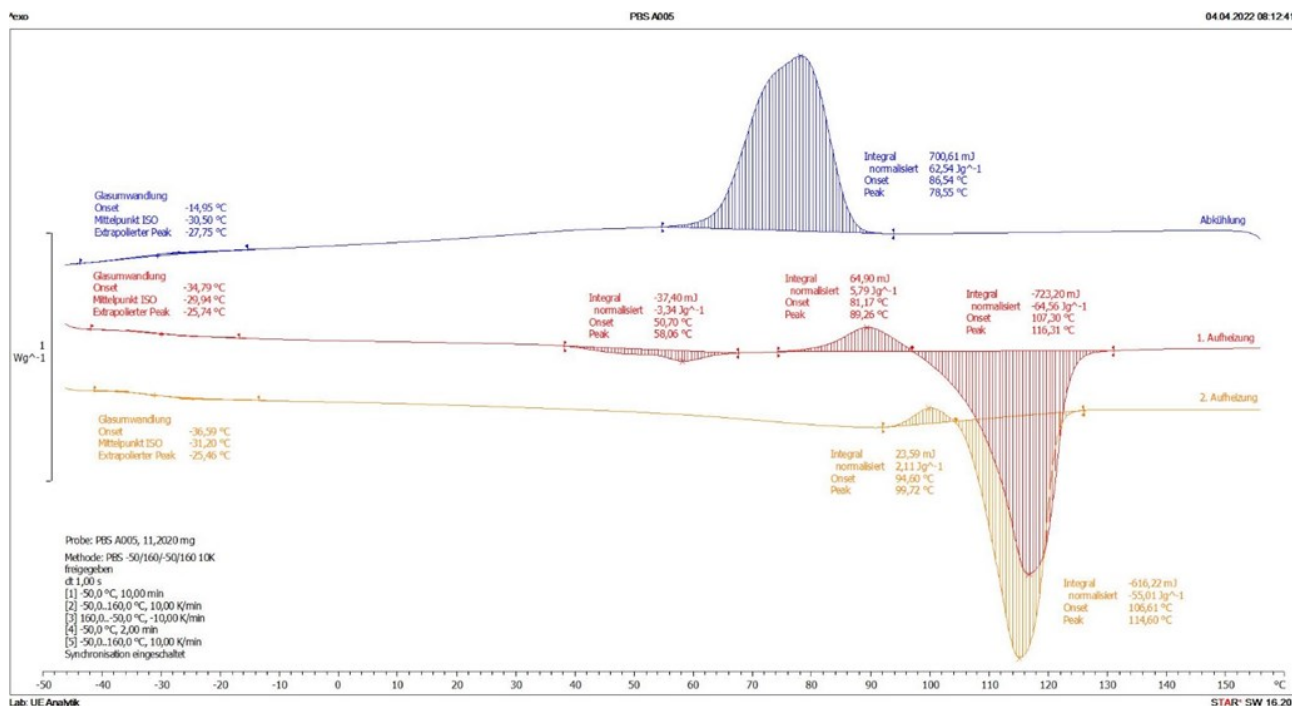


Abbildung 67: DSC PBS

### Thermogravimetrische Analyse (TGA)

Mittels TGA wird die Massenänderung der Probe über Temperatur und Zeit gemessen. Dies gibt Aufschluss über die Zersetzungstemperatur von Polymeren und flüchtigen Additiven, z.B. Weichmachern. Die Ergebnisse der TGA der ausgewählten Biopolymere sind im Folgenden dargestellt.

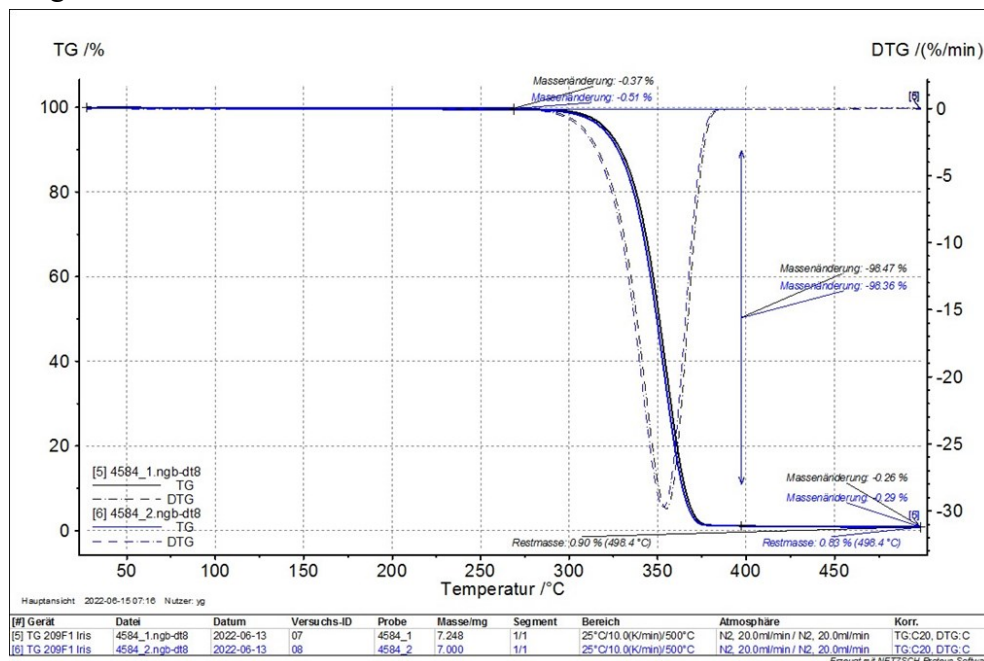


Abbildung 68: TGA teilkristallines PLA

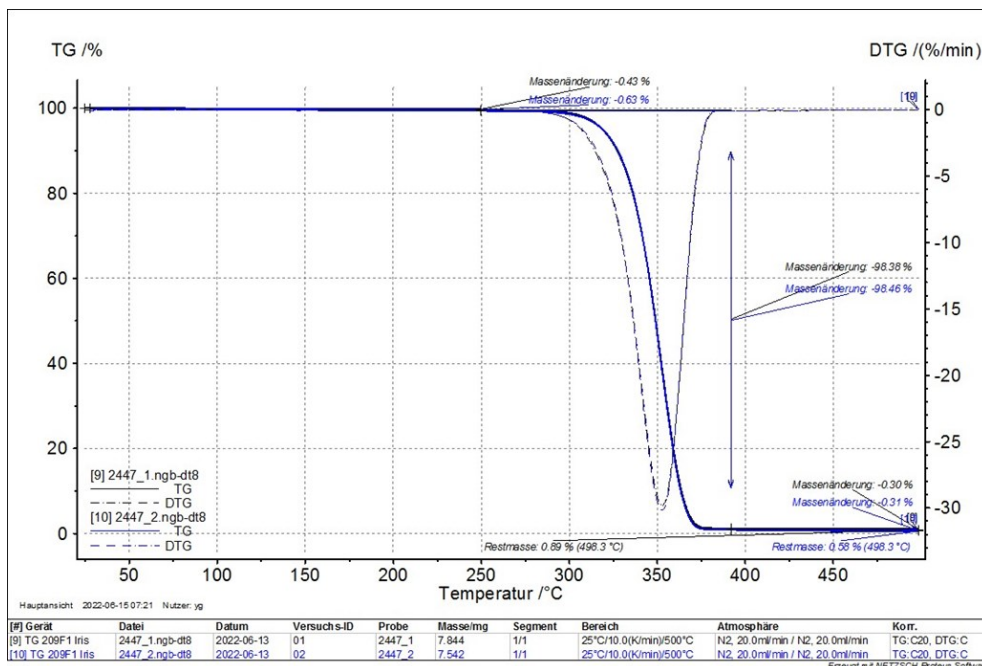


Abbildung 69: TGA amorphes PLA

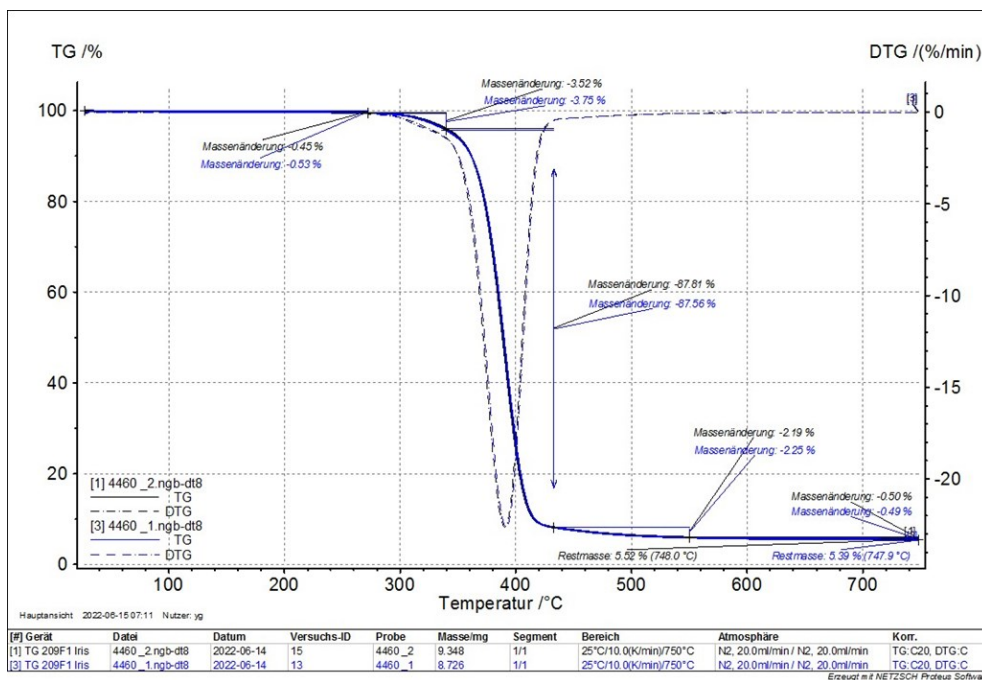


Abbildung 70: TGA PBAT

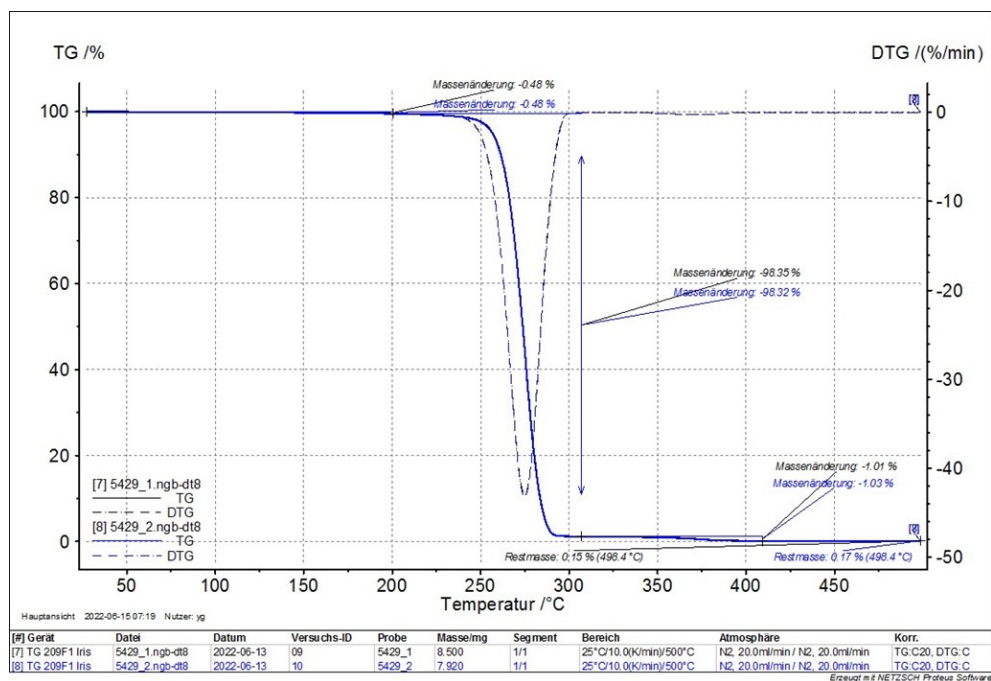


Abbildung 71: TGA PHBH

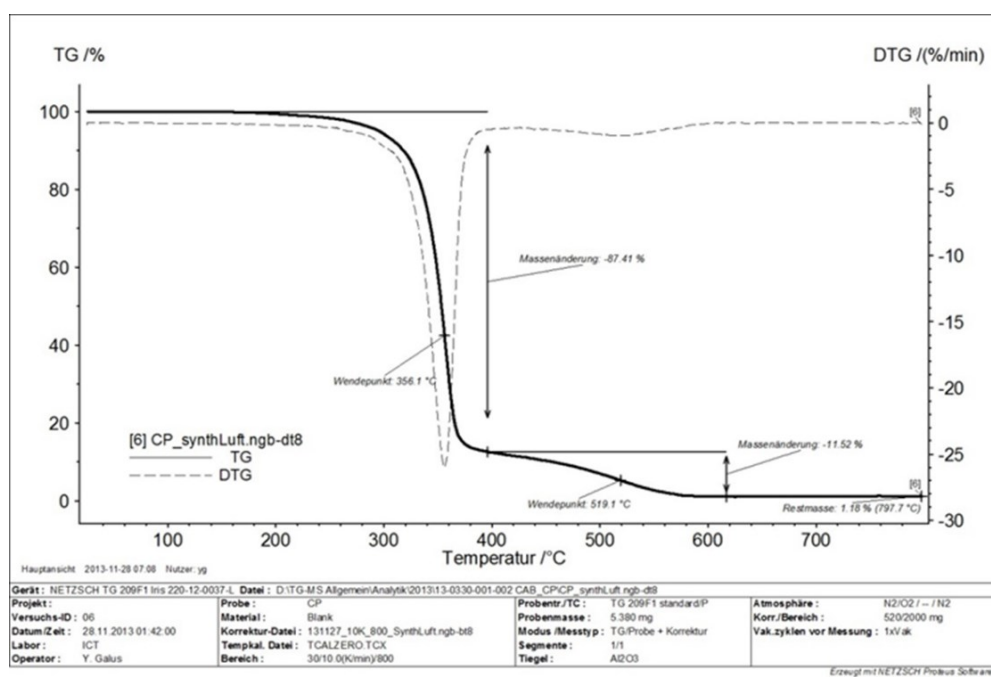


Abbildung 72: TGA CP

### 3.8.1.3 Charakterisierung des Compounds

(TECNARO GmbH)

Die Schmelze-Volumenfließrate (englisch MVR = Melt Volume-flow Rate) dient zur Charakterisierung des Fließverhaltens (Formmassenprüfung) eines Thermoplasten bei bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen. Der MVR nach ISO 1133 wird mittels eines Kapillarrheometers ermittelt, wobei das Material (Granulat oder Pulver) in einem beheizbaren Zylinder aufgeschmolzen und unter einem durch die Auflagelast entstehenden Druck durch eine definierte Düse (Kapillare) gedrückt wird. Ermittelt wird das austretende Volumen bzw. Masse der Polymerschmelze (des sogenannten Extrudats) als Funktion der Zeit. Ein wesentlicher Vorteil der Schmelze-Volumenfließrate liegt in der einfachen Messung des Kolbenwegs bei bekanntem Kolbendurchmesser zur Bestimmung des ausgetretenen Schmelzevolumens.

$$\text{MVR} = \text{Volumen}/10 \text{ min}$$

Die Einheit für den MVR ist  $\text{cm}^3/10 \text{ min}$



Abbildung 73: Gerät zur Bestimmung des MVR-Wertes



Abbildung 74: Bestimmung der Schlagzähigkeit

Zur Charakterisierung der entwickelten und hergestellten Werkstoffe werden in einer 50 to-Spritzgießmaschine Zugproben (Stäbe) hergestellt.



Abbildung 75: 50 to Spritzgießmaschine



Abbildung 76: Hergestellte Zugstäbe

Neben der bereits erwähnten Kenngröße MVR stellt die Schlagzähigkeit eine wichtige Kenngröße in der Materialentwicklung dar. Die Schlagzähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Werkstoffs, Stoßenergie und Aufprallenergie zu absorbieren. Die Schlagzähigkeit wird als Verhältnis von Kerbschlagarbeit und Probekörperquerschnitt berechnet (Maßeinheit  $\text{kJ/m}^2$ ).

Darüber hinaus wurden auch Zugfestigkeitsprüfungen sowie Prüfungen der thermischen Eigenschaften durchgeführt. Sie stellen zusammen mit der Schlagzähigkeit wichtige Kenngrößen für die Entwicklung einer geeigneten Wuchshülle dar.

Die Zugprüfung, auch als Zugversuch bekannt, ist eine grundlegende materialwissenschaftliche und technische Prüfung, bei der eine Probe einer kontrollierten Spannung bis zum Versagen ausgesetzt wird. Zu den Eigenschaften, die in einem Zugversuch direkt gemessen werden, gehören der Zugmodul, die Zugfestigkeit, die Dehnung bei Zugfestigkeit, die Zugspannung bei Bruch und die Zugdehnung bei Bruch. Zugproben werden in einer 50-to-Spritzgießmaschine hergestellt. Die Messungen werden in einer Zugprüfmaschine gemäß ISO 527 durchgeführt.

Die Wärmeformbeständigkeit ist ein Maß für die Temperaturbeständigkeit von Kunststoffen. Aufgrund des viskoelastischen Materialverhaltens gibt es für Kunststoffe keine streng definierte obere Gebrauchstemperatur, sondern es wird ein Ersatzwert unter einer definierten Belastung ermittelt. Hierfür steht ein genormtes Verfahren zur Verfügung.



Abbildung 77: Zugprüfung



Abbildung 78: Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur

Die Vicat-Erweichungstemperatur (VST) nach DIN EN ISO 306 wird mit einer Nadel (mit einer Kreisfläche von  $1 \text{ mm}^2$ ) gemessen. Diese wird mit einer Prüfkraft von 10 N belastet (Prüfkraft A)). Der Prüfling wird mit einer definierten Erwärmungsrate von 50 K/h beaufschlagt. Der VST ist erreicht, wenn der Probekörper auf eine definierte Temperatur erwärmt ist. Der VST ist erreicht, wenn der Eindringkörper eine Eindringtiefe von 1 mm erreicht. Die Prüfung ist laut Norm nur für Thermoplaste anzuwenden und gibt Auskunft über die praktische Dauergebrauchsgrenze, die etwa 15 K unter der Vicat-Temperatur liegt.

### 3.8.2 Verpackungen / Demonstratoren





#### 3.8.2.1 Rezyklierbarkeit





(DHBW Karlsruhe)

Die CEPI (Confederation of European Paper Industries) ist eine Organisation, die die europäische Papier- und Zellstoffindustrie vertritt. Die CEPI hat eine Methode zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Papier- und Kartonverpackungen entwickelt. Diese Methode soll sicherstellen, dass Verpackungen in Bezug auf Recyclingfähigkeit optimiert werden können. Die neu entwickelte Methode vereint verschiedene Aspekte bereits bestehender und teilweise sehr alter Methoden und soll damit eine universelle Methode darstellen, die die modernen Aspekte unserer Gesellschaft berücksichtigt und vereinheitlicht.

Die Methode berücksichtigt die Materialien aus denen die Verpackung besteht. Es wird geprüft, ob die Materialien für eine erfolgreiche Trennung und Recycling geeignet sind. Die CEPI-Methode untersucht auch die verwendeten Druckfarben und Additive in der Verpackung. Diese sollten ebenfalls recyclingfreundlich sein, um die Qualität des recycelten Materials nicht zu beeinträchtigen. Die Methode berücksichtigt die Art der Klebstoffe, die in der Verpackung verwendet werden. Recyclingfreundliche Klebstoffe sind wichtig, um eine effiziente Trennung der Materialien zu ermöglichen. Die Struktur der Verpackung spielt ebenfalls eine Rolle. Eine einfache und eindeutige Struktur erleichtert den Recyclingprozess im Vergleich zu komplexen, schwer trennbaren Designs. Die Methode betrachtet auch die Sortier- und Sammelsysteme für Verpackungen. Diese sollten so gestaltet sein, dass sie eine effiziente Trennung und Sammlung von recycelbaren Materialien ermöglichen.

Untersucht wurden die hergestellten Demonstratoren aus den Materialien CP mit 20% Jelu-Faser, CP mit 20% Rettenmaier-Fasern und NBSK mit 6% Chitosan.

	CP-Jelu	CP-Rettenmaier	NBSK Chitosan B 6%
Einwaage für Desintegration	25 <sup>1)</sup>	25 <sup>1)</sup>	50
10 min desintegriert			
Nach weiteren 10 min Desintegration	---	---	

Nach 60 min Quellzeit und weiteren 10 min Desintegrieren	---	---	 5)
Verdampfungsrückstand	Nicht durchgeführt	2,1 %	Nicht durchgeführt
Somerville grob	 3)		
Rückstand auf Lochplatte			
Rückstand grob	95,68 %	60,65 %	91,20 %
	Abbruch, da bereits über 95% in Grobfraction	Abbruch, da bereits über 60% in Grobfraction	Abbruch, da bereits über 90% in Grobfraction, nach 30 min Di
Gutstoff		 4)	5,9%
	Partikel des Gutstoffs hauptsächlich aus kleinen Plastikpartikeln, keine freien Fasern vorhanden	Partikel des Gutstoffs hauptsächlich aus kleinen Plastikpartikeln, keine freien Fasern vorhanden	Wenige Fasern frei gesetzt
Ergebnis	Material nicht recyclingfähig, wird im Altpapierprozess durch	Material nicht recyclingfähig, wird im Altpapierprozess durch	

	Aufschwimmen aber abgetrenne	Aufschwimmen aber abgetrenne	
--	------------------------------	------------------------------	--

Tabelle 14: Rezyklierversuche Ergebnisse

- 1) Menge reduziert, da Volumen zu groß
- 2) Das zerkleinerte Material schwimmt auf dem Wasser, das Wasser ist sehr klar
- 3) Schlecht homogenisiert im Fraktionierer, Fragmente schwimmen auf dem Wasser
- 4) Gutstoff besteht bei beiden CP-Proben aus kleinen Materialschnipseln. Freie Fasern nicht vorhanden
- 5) Nachdem nach 10 Minuten keine Zerfaserung festgestellt wurde, wurde die Desintegrationszeit um weitere 10 min auf 20 min verlängert.

Keines der erzeugten Produkte ist recyclingfähig. Die geschäumten Cellulosepropionat-Proben können allerdings im Altpapierrecyclingprozess abgetrennt werden, da sie durch den Schäumvorgang eine geringe Dichte besitzen und in Wasser schwimmen. Der Anteil an freien Fasern lag unterhalb der Nachweisgrenze. Selbst der Gutstoff nach der Grobfraction besteht aus Polymerfragmenten (Mikroplastik!), die aufschwimmen.

Die NBSK-Probe mit 6% Chitosan B hat sich als überaus nassfest herausgestellt. Selbst nach 30 Minuten Desintegrationszeit hat sich das Material nicht zerfasern lassen. Der Gutstoff der Grobfraction enthält nur ca 6% freie Fasern bezogen auf die 50g Einwaage.

### 3.8.2.2 BCT

*(DHBW Karlsruhe)*

Der BCT (Box Compression Test) ist ein Testverfahren, das in der Verpackungsindustrie verwendet wird, um die Stapelfestigkeit von Wellpappboxen oder Kartons zu bewerten. Die Stapelfestigkeit ist die Fähigkeit einer Verpackung, das Gewicht von darüber liegenden Boxen oder anderen Lasten zu tragen, ohne zu verformen oder zu versagen.

Der BCT misst die maximale Kraft, die auf eine Box ausgeübt werden kann, bevor sie zusammenbricht oder deformiert wird. Dieser Test ist wichtig, um sicherzustellen, dass Verpackungen während des Transports, der Lagerung oder des Handlings in Lieferketten standhalten können.

Der Test wird normalerweise durchgeführt, indem die zu testende Box zwischen zwei Platten platziert wird. Dann wird Druck auf die Oberseite der Box ausgeübt, bis sie zusammenbricht. Die gemessene Kraft wird in Pfund oder Newton gemessen und repräsentiert die Stapelfestigkeit der Box.

Die Informationen, die durch den BCT gewonnen werden, sind für Verpackungsdesigner und Hersteller entscheidend, um sicherzustellen, dass die Verpackungen den Anforderungen der Lieferkette entsprechen und die darin enthaltenen Produkte schützen können.

Die in diesem Projekt hergestellten Demonstratoren sind keine Wellpappenfaltschachteln, sondern Schalen. Auch diese Schalen sollten bestimmten Anforderungen entsprechen und ebenfalls eine gewisse Stabilität aufweisen. Um dies zu charakterisieren und die Produkte untereinander vergleichen zu können, wurde mit derselben Vorrichtung die maximale Kraft bis zum Kollabieren der Schale gemessen, mit der üblicherweise der BCT gemessen wird. Der Messumfang

sind jeweils  $n = 10$  eckige Schalen, nur bei CP mit Jelu-Faser konnten nur 7 Werte in die Statistik fließen.

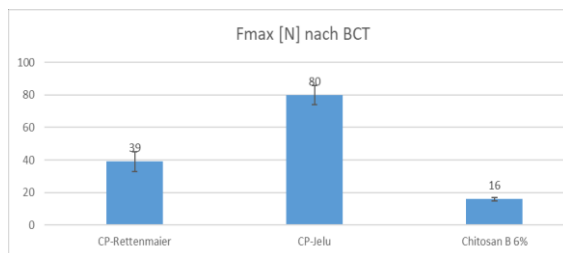


Abbildung 79: BCT Fmax in N Demonstratoren

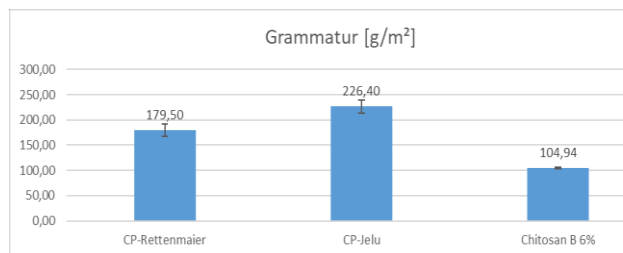


Abbildung 80: Grammatr in g/m² Demonstratoren

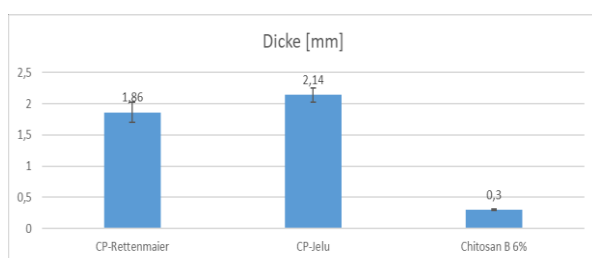


Abbildung 81: Dicke in mm Demonstratoren

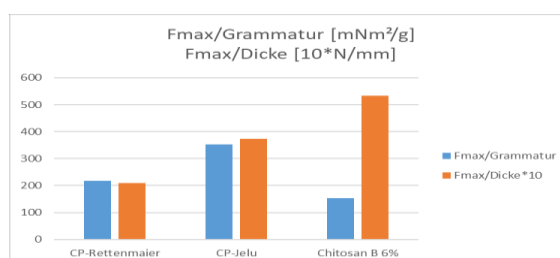


Abbildung 82: Gewichteter BCT Demonstratoren

Die maximal gemessene Kraft der BCT-Messung korreliert ganz offensichtlich mit der Grammatr und der Dicke des Materials, d.h. je mehr Material eine Probe hat, bzw je dicker die Probe ist, um so eine höhere Kraft wird gemessen. Die Unterschiede sind herstellungsbedingt. Der ermittelte Mittelwert der maximalen Kraft aus dem BCT kann mit der Grammatr, bzw mit der Dicke ins Verhältnis gesetzt werden, um einen Wert zu erhalten, der unabhängig von der Materialmenge bzw -dicke ist. Diese Werte sind miteinander vergleichbar. Sowohl bei der Grammatr als auch bei der Dicke wurden  $n = 10$  Schalen nach der Umformung vermessen. Die Werte Fmax/Dicke wurden mit dem Faktor 10 multipliziert. Damit lassen sich die Balken besser vergleichen. So zeigen die Cellulosepropionat-Proben jeweils ähnliche Werte, während die Werte der Chitosan-Probe stark voneinander abweichen. Der Unterschied entsteht durch den Schäumvorgang bei der Herstellung des Cellulosepropionats. Da das Schäumen durch den Druckabfall beim Extrudieren geschieht, liegt kein ungeschäumtes Material vor, um eine Vergleichbarkeit herzustellen.

Dennoch kann festgestellt werden, dass es durch die Schäumung der CP-Halbzeuge zu einer höheren Festigkeit kommt, vor allem bezogen auf die Grammatr und damit die Dichte.

Die Papierproben mit Chitosan sind viel dünner als die CP-Proben. Hier soll auch noch erwähnt werden, dass durch einen mehrschichtigen Aufbau einen größerer Stapelstauchwiderstand erreicht werden kann.

## 3.9 Projektmanagement (AP 8)

### 3.9.1 Projekttreffen

Ein Überblick über die Projekttreffen und Arbeitstreffen gibt die folgende Tabelle:

Datum	Aktion/Ort	Teilnehmer	Inhalte
29.04.2021	Kick-Off / Video-konferenz	Alle Projektpartner	Kick-Off-Meeting zur Besprechung des Projektes und Planung der ersten Schritte
12.05.2021	Arbeitstreffen, Videokonferenz	DHBW, ICT, Tecnaró	Genauere Planung und Festsetzung der eingesetzten Materialien
30.06.2021	Projekttreffen, Gernsbach, vor Ort und per Video	Alle Projektpartner	Projekttreffen zur Besprechung der Ergebnisse und der daraus resultierenden nächsten Schritte; Besichtigung der Labore im Papierzentrum
14.10.2021	Projekttreffen ICT, vor Ort und per Video	Alle Projektpartner	Projekttreffen zur Besprechung der in der Zwischenzeit erarbeiteten Erkenntnisse; Besichtigung der Anlagen zur Aufschäumung von Polymeren
17.03.2022	Projekttreffen/ Gernsbach	Alle Projektpartner	Weitere Planung der Versuche und Besprechung der bisherigen Ergebnisse, Besichtigung des Labors in Gernsbach
06.04.2022	Versuche/ Pfinztal	Fraunhofer ICT, TECNARO GmbH, Mack GmbH, DHBW Karlsruhe	Schäumversuche
21.07.2022	Arbeitstreffen/ Pfinztal	Alle Projektpartner	Besprechung aktueller Stand
18.10.2022	Projekttreffen/ Karlsruhe	Alle Projektpartner	Projekttreffen zur Besprechung der Ergebnisse und der daraus resultierenden nächsten Schritte; Besichtigung der Werkstatt und der Labore in Karlsruhe
17.01.2023	Arbeitstreffen / Gernsbach	Fraunhofer ICT, TECNARO GmbH, Mack GmbH, DHBW Karlsruhe	Besprechung Ergebnisse, weiteres Vorgehen
30.03.2023	Projekttreffen / virtuell	Alle Projektpartner	Besprechung Ergebnisse, weiteres Vorgehen
03.05.2023	Arbeitstreffen / Aschaffenburg	Alle Projektpartner	Ergebnisse Versuche, Betriebsbesichtigung
20.07.2023	Projekttreffen / Pfinztal	Fraunhofer ICT, TECNARO GmbH, Mack GmbH, DHBW Karlsruhe	Besprechung Ergebnisse, weiteres Vorgehen
27.09.2023	Abschlusstreffen / Ulm	Alle Projektpartner	Betriebsbesichtigung, Herstellung der Demonstratoren

Tabelle 15: Übersicht Projekt- und Arbeitstreffen

### 3.9.2 Transferleistungen / Öffentlichkeitsarbeit

Zur Verbreitung und Bekanntmachung des Projektes wurden verschiedene Artikel veröffentlicht und Präsentationen gehalten. Außerdem gab es viele Kontakte mit Firmen, die Interesse an den Ergebnissen gezeigt haben. Gespräche wurden mit STI, Storaenso und tesa SE geführt.

Datum	Wo	Was
Juni 2022	Zellcheming Conference	Posterpräsentation
Juli 2022	Linkedin	Beitrag
September 2022	BMBF	Porträt
Februar 2023	IHK Magazin	Artikel
Mai 2023	BioPro	Artikel
Juli 2023	DHBW Stuttgart Forschungstag	Posterpräsentation

Tabelle 16: Öffentlichkeitsarbeit Übersicht

## 4 Zusammenfassung und Wertung der Ergebnisse

Insgesamt wurden Werkstoff- und Prozessentwicklungen im Rahmen von 4 verschiedene Projekttrouten / Lösungen durchgeführt. Zwei dieser Projekttrouten (Route 1 und Route 4) wurden aufgrund der Ergebnisse bis zur Umsetzung in konkrete Demonstratoren weitergeführt.

Bei Route 1 wurden biobasierte Polymere mit Fasern compounding (TECNARO GmbH), welche am Fraunhofer ICT mittels Extrusions- und Autoklavverfahren zu geschäumten Halbzeugen verarbeitet wurden. Der wesentliche Anspruch hierbei war einen möglichst hohen Cellulosefaseranteil bei möglichst niedriger Schaumdichte und gegebener Prozessstabilität zu erreichen. Dies konnte mit CP-Schaumfolie bei einem max. Faseranteil von 20% Cellulosefasern (Jelu HM90) im Extrusionsprozess erreicht werden. Die Dichten liegen mit ca. 80-100 kg/m<sup>3</sup> in einem vergleichbar niedrigen Bereich und die Weiterverarbeitung mittels Thermoformen zu einem Bauteil verlief erfolgreich. Damit konnte ein valider Demonstrator im Projekt hergestellt werden.

Die Schäumversuche der weiterhin ausgewählten Biopolymere mündeten nicht in einem Demonstrator, allerdings lieferten sie umfassende Ergebnisse und Erfahrungen im Bereich neuer Biopolymersysteme für die Anwendung im Verpackungsbereich.

Bei Route 4 führte Cellulose in Kombination mit 6% Chitosan 90/100/A1 zu einem guten Ergebnis, welches eine Formbarkeit der Halbzeuge ermöglicht. Hierfür wurden verschiedene Auftrags- und Einbringungsverfahren entwickelt und Chitosan wurde im Papierherstellungsprozess mit eingebracht.

Die Proben wurden im Anschluss aktiviert, um eine Wasserlöslichkeit des Chitosan zu erreichen. Dazu wurde 3% Essigsäure aufgesprüht, die Proben getrocknet, wiederbefeuchtet und umgeformt. Es konnte eine Umformtiefe von 25mm erreicht werden.

Insgesamt weist das entwickelte und eingesetzte Chitosan-Papier eine sehr gute Nassfestigkeit und eine sehr hohe Zugkraft auf, und stellt somit einen neuen modifizierten Cellulosewerkstoff dar mit großem Potential.

Eine Thematik, die in weiterführenden Arbeiten noch optimiert werden sollte, ist das reproduzierbare Einstellen der Feuchtigkeit, die zur Umformung benötigt wird, sowie der Trockenprozess zu Erreichung der Formstabilität. Ein weiterer Aspekt, der zur Verbesserung der Umformbarkeit und der mechanischen Eigenschaften beitragen kann, ist die Entwicklung von Mehrschichtaufbauten. Hierdurch könnten Risse vermieden, bzw. auf unterschiedliche Lagen verteilt werden und ein stabileres Gefüge erreicht werden.

Unter Berücksichtigung der aufgezeigten Randbedingungen bietet die Entwicklung eine großes Potential zukünftig in eine industrielle Umsetzung überführt zu werden.

## **5 Zahlenmäßiger Nachweis**

Die Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind dem Verwendungsnachweis zu entnehmen

## **6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten**

Die im Antrag vorgesehenen Arbeiten wurden gemäß dem Arbeitsplan erfolgreich abgeschlossen. Die Ergebnisse sind insgesamt sehr vielversprechend. Alle durchgeführten Arbeiten waren für die zielorientierte Bearbeitung des Projekts notwendig und angemessen.

Das Interesse an alternativen Verpackungslösungen, insbesondere zu Kunststoff, ist ungebrochen. Dadurch können die Lösungen zu einer Alternative zu petrobasierten Kunststoffverpackungen beitragen und gleichzeitig ein Beitrag zur Stärkung der bio-basierten Wirtschaft geleistet werden.

## **7 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Für die DHBW Karlsruhe bedeutet das Forschungsvorhaben einen Ausbau der Expertise im Thermoformen von natürlichen Polymeren. Das erarbeitete Know-How und das neuentwickelte Material sollen die Grundlage für aufbauende Projekte sein.

Für die DHBW Karlsruhe konnten mit dem Projekt die Expertise im Bereich biobasierter und vornehmlich Cellulose basierter Werkstoffe erheblich ausgebaut werden. Das Know-How welches aus den neuen Werkstoffentwicklungen gewonnen wurde, ist als Wissensvorsprung und

für zukünftige Forschungsvorhaben von großer Bedeutung. Des Weiteren konnten neue Kenntnisse im Thermoformprozess gewonnen werden, die für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die DHBW von großer Bedeutung sind.

Das Fraunhofer ICT konnte im Rahmen dieses Projektes besonders im Bereich der Einbringung von Fasern in thermoplastische Schaumstoffe und im Schäumen von neuen Biopolymersystemen wertvolle Erfahrungen und Ergebnisse gewinnen. Beides zielt auf die Themen Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung und Umweltschutz ab. Die Expertise aus 3D-Thermocell wird in zukünftigen Projekten mit diesen Schwerpunkten genutzt werden und in Arbeiten mit der Industrie einfließen.

Das Ziel der Fa. TECNARO bei der Verwertung der Ergebnisse besteht konkret darin, auf Basis der im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse eine Reihe von maßgeschneiderten Compounds für neue Zielmärkte zu entwickeln. Im Rahmen des Vorhabens 3D ThermoCell ist es gelungen, das Know-How der nachhaltigen thermoplastischen Werkstoffe in Bezug auf Materialeigenschaften sowie auf neue Anwendungsmöglichkeiten zu erweitern. Es werden Zielanwendungen beispielsweise im Bereich der geschäumten Werkstoffe akquiriert werden. Eine wichtige Anwendung liegt hierbei im Verpackungsbereich.

Die neuen prozess- und verfahrenstechnischen Erkenntnisse zur Verarbeitung von Biopolymeren und Papierwerkstoffen konnten bei Mack zu einem Ausbau des Know-hows in einem völlig neuen Anwendungsfeld führen. Wird auf Basis der Erkenntnisse die Umformung von Papierwerkstoffe zur Marktreife entwickelt, eröffnet sich für Mack ein großes Potential neuer Anwendungen und damit ein neues Geschäftsfeld.

Mainteam konnte erstmalig Leichtschaummaterialien bedrucken und zu Testzwecken weiterverarbeiten. Dadurch wird ein neues Marktsegment eröffnet, das bislang nicht zum Portfolio des Agenturgeschäfts gehörte. Durch neue Geschäftskontakte besteht die Chance einer Umsatzsteigerung.

## **8 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Konkrete vergleichbare Entwicklungen auf diesem Gebiet außerhalb des Projektkonsortiums gab es keine Vergleichbaren. Neue Entwicklungen im Bereich Papierbasierter Werkstoffe beziehen sich meist auf Fasergussverfahren bzw. Faserform-Verpackungen oder auf die Formung sehr dickwandiger mehrlagiger Papierhalbzeuge. Neue Entwicklungen im Bereich des Thermoformens haben ihren Fokus auf der Prozess- und Anlagentechnik zur Fertigung von Kunststoffbauteilen.

## 9 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die erfolgten Veröffentlichungen sind in Kapitel 3.9.2 (Transferleistungen und Öffentlichkeitsarbeit) dargestellt. Weiterhin geplant sind verschiedene Messeauftritte, bei denen die erarbeiteten Lösungen vorgestellt werden soll. Dazu gehören die Fachpack, Fakuma, K-Messe sowie der Forschungstag der DHBW. Im Dezember 2023 wird ein Vortrag zu den Projektergebnissen im Rahmen des Forschungskolloquiums der DHBW-Karlsruhe erfolgen. Im Januar 2024 wird eine Pressemitteilung seitens der DHBW erfolgen. Die Firma Mack plant im Februar 2024 die Teilnahme an der Messe KPA (Kunststoffe Produkte Aktuell) in Ulm und Vorstellung von Ergebnissen. Im Juli 2024 ist geplant am Forschungstag an der DHBW-Karlsruhe Ergebnisse des Projektes präsentieren. Das Fraunhofer ICT wird die erzielten Ergebnisse im Rahmen einer geplanten Veröffentlichung in einem Fachmagazin (z.B. Kunststoffe) verwerthen.

## 10 Literaturverzeichnis

- al., N. e. (2007). Aspekte von Verpackungsmaterialien bei Ökoprodukten. *Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL)*.
- Aldi. (2023). *Aldi Verpackungsmision*. Von <https://www.aldi-sued.de/de/nachhaltigkeit/klima-und-umwelt/verpackungsmision.html> abgerufen
- Habibie S, u. (Juli 2016). The effect of chitosan on physical and mechanical properties of paper. *Journal of Chemical Engineering and Materials Science* 7., S. 1-10. doi:10.5897/JCEMS2015.0235
- Hunter, D. (1978). *Papermaking: The history and technique of an ancient craft*. New York: Dover books on crafts, handicrafts, construction . Von <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0707/77092477-d.html> abgerufen
- Kauertz, B. (2021). *Ökobilanzielle Expertisen zu verschiedenen Lebensmittelverpackungen im Auftrag des Naturschutzbundes Deutschland e.V.* Heidelberg: ifeu.
- Khakalo u.a., A. (2014). Using gelatin protein to facilitate paper thermoformability. *Reactive and Functional Polymers* 85, S. S. 175-184. doi:10.1016/j.reactfunctpolym.2014.09.024
- Lidl. (2023). *Lidl Kreislaufwirtschaft*. Von <https://unternehmen.lidl.de/verantwortung/gut-fuer-den-planeten/ressourcen-schonen/handlungsfelder/kreislaufwirtschaft> abgerufen
- Millon, L. E., Oates, C. J., & Wan, W. (2009). Compression properties of polyvinyl alcohol-bacterial cellulose nanocomposite. *Journal of biomedical material research*, S. 922-929. doi:10.1002/jbm.b.31364
- NatureWorks. (2023). *Comparative Life Cycle Assessment of Ingeo, PET, and PP Drinking Cups*. Von [https://www.natureworksllc.com/sustainability/eco-profile-and-life-cycle-analyses/life-cycle-analysis/cups\\_pea](https://www.natureworksllc.com/sustainability/eco-profile-and-life-cycle-analyses/life-cycle-analysis/cups_pea) abgerufen

- Nowack, K. e. (2007). *Aspekte von Verpackungsmaterialien bei Ökoprodukten*. CH-Frick: Forschungsinstitut für biologischen Anbau (FiBL).
- Oksman Niska, K., Mathew, A. B., Rojas, O. J., Sain, M., & Eds. (2014). *Handbook of Green Materials; World Scientific series in materials and energy*. New Jersey: World Scientific.
- Statista. (März 2021). *Statista*. Von Umfrage zur Nachhaltigkeit von Verpackungen: <https://www.umweltdialog.de/de/wirtschaft/circular-economy/2021/Konsumenten-wollen-mehr-recyclingfaehige-Lebensmittelverpackungen.php> abgerufen
- Stevens, E. S. (2002). *Green plastics; An introduction to the new science of biodegradable plastics*. Princeton University Press. Von <http://www.loc.gov/catdir/samples/prin031/> abgerufen
- Tharanathan, R. N., & Kittur, F. (2003). Chitin - The Undisputed Biomolecule of Great Potential. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, S. 61 - 87. doi:10.1080/10408690390826455
- Umweltdialog. (2021). *Umweltdialog*. Von <https://www.umweltdialog.de/de/wirtschaft/circular-economy/2021/Konsumenten-wollen-mehr-recyclingfaehige-Lebensmittelverpackungen.php> abgerufen
- Verpackungsregister, Z. S. (2023). *Mindeststandard recyclinggerechtes Design von Verpackungen*. Von Verpackungsregister: [https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Mindeststandard/Mindeststandard\\_VerpackG\\_Ausgabe\\_2023.pdf](https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Mindeststandard/Mindeststandard_VerpackG_Ausgabe_2023.pdf) abgerufen