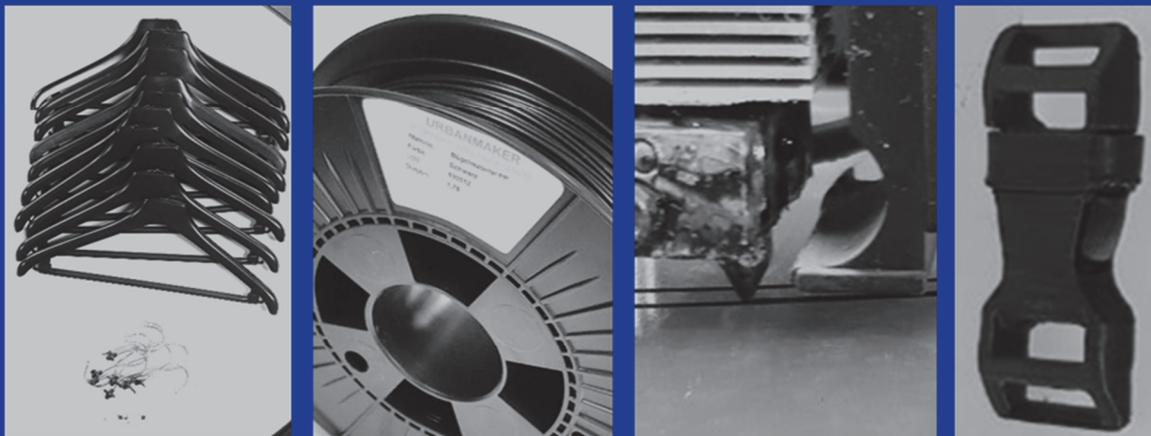


Business Case

Eine betriebswirtschaftliche Analyse des Einsatzes von 3D-Druck im Kontext des Kunststoffrecyclings innerhalb der textilen Lieferkette

Britta Frommeyer, Kristina von Gehlen,
Julia Koch, Maren Tornow, Juri Boos,
Gerhard Schewe, Carla Scagnetti



Eine Initiative des Bundesministeriums
für Bildung und Forschung

Plastik in der Umwelt

Quellen • Senken • Lösungsansätze



www.plastikvermeidung.de

Business Case

Eine betriebswirtschaftliche Analyse des Einsatzes von 3D-Druck im Kontext des Kunststoffrecyclings innerhalb der textilen Lieferkette

Britta Frommeyer, Kristina von Gehlen, Julia Koch, Maren Tornow,
Juri Boos, Gerhard Schewe, Carla Scagnetti

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FONA

Forschung für Nachhaltigkeit

Autorinnen und Autoren

Frommeyer, Britta

Forschungsstelle für allgemeine und textile Marktwirtschaft, Universität Münster

Von Gehlen, Kristina

Forschungsstelle für allgemeine und textile Marktwirtschaft, Universität Münster

Koch, Julia

Forschungsstelle für allgemeine und textile Marktwirtschaft, Universität Münster

Tornow, Maren

Forschungsstelle für allgemeine und textile Marktwirtschaft, Universität Münster

Boos, Juri

Urbanmaker 3D-DRUCK CONSULTING & SERVICE

Schewe, Gerhard

Forschungsstelle für allgemeine und textile Marktwirtschaft, Universität Münster

Scagnetti, Carla

Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung, Universität Stuttgart

Forschungsstelle für Allgemeine und Textile Marktwirtschaft an der Universität Münster

Universitätsstraße 14 - 16

48143 Münster

Deutschland

Tel.: +49 251 83-22831

fatm@wiwi.uni-muenster.de

Druckvorlage fertiggestellt 04/2021

Dieses Dokument steht online zur Verfügung unter: www.fatm.de

Titelbild: Eigene Aufnahmen

Danksagungen

Wir bedanken uns für die sehr gute Zusammenarbeit mit Carla Scagnetti, Manuel Lorenz, und Friederike van den Adel der Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung des Instituts für Bauphysik der Universität Stuttgart, welche die ökobilanziellen Berechnungen in diesem Business Case erstellt haben.

Ein großes Dankeschön geht ebenfalls an alle Projektpartner und Unternehmen, mit denen wir uns über die Verwendung von Kunststoffverpackungen ausgetauscht haben.

Weiterhin bedanken wir uns für die Unterstützung von Elena Wittke und Jana Pfeiffer bei der Erstellung des Berichts.

Die Inhalte der vorliegenden Arbeit beziehen sich in gleichem Maße auf Frauen, Männer und Personen, die sich keinem spezifischen Geschlecht zuordnen. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird die jeweilige Form des Bezugswortes (Verbraucher, Kunde etc.) für alle Personenbezeichnungen gewählt.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Förderschwerpunkt Sozial-ökologische Forschung unter dem Förderkennzeichen 01UP1701 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	9
2 Kunststoffrecycling entlang der textilen Lieferkette	10
2.1 Die Rolle von Kunststoffverpackungen in der textilen Lieferkette	10
2.2 Recycling von Kunststoffverpackungen entlang der textilen Lieferkette	10
2.2.1 Die Abfallhierarchie und ihre Problematik	10
2.2.2 Gesetzliche Vorgaben zum Kunststoffrecycling	12
2.2.3 Einflussfaktoren auf das Kunststoffrecycling entlang der textilen Lieferkette .	13
2.2.4 Situation am Point of Sale	14
2.2.5 Herausforderungen des Kunststoffrecyclings	15
3 Ansätze zur Verbesserung des Recyclings entlang der textilen Lieferkette mittels 3D-Druck	17
3.1 Betriebswirtschaftliches Konzept für den Betrieb einer Recyclinganlage für Kunststoffabfälle am Point of Sale	17
3.1.1 Erläuterung Grundidee	17
3.1.2 Allgemeine Anforderungen an die praktische Umsetzbarkeit des Konzepts	17
3.1.3 Analyse der praktischen Umsetzbarkeit des Konzepts	18
3.1.4 Ausarbeitung der Alternative „FATM-Konzept“	26
3.1.4.1 Erläuterung der Grundidee	26
3.1.4.2 Betriebswirtschaftliche Betrachtung	26
3.1.4.3 Ökobilanzielle Bewertung	29
3.2 Erforschung der Nutzung von bioabbaubarem Kunststoff im 3D-Druck	38
3.2.1 Analyse des bioabbaubaren Kunststoffs PHBV	39
3.2.2 Analyse des bioabbaubaren Kunststoffs PHB	39
3.3 Produktionsverfahren für Textilien aus Rezyklaten/PHB im 3D-Druck	40
3.3.1 Überblick Status Quo Einsatz von 3D-Druck in der Textilindustrie	40
3.3.2 Anforderungen an die Beschaffenheit 3D-gedruckter Bekleidung	41
3.3.3 Evaluation von TPU, R-PP, R-PS und PHB	41
3.3.4 Fazit zur Eignung der getesteten Kunststoffe	47
4 Handlungsempfehlungen	48
4.1 Kurz- und mittelfristig umsetzbare Maßnahmen	48
4.2 Langfristig umsetzbare Maßnahmen	49
4.3 Regulatorische Maßnahmen	50
5 Fazit	52

Anhang A: Status quo Nutzung von 3D-Druck zur Herstellung von Textilien	53
Anhang B: Ökobilanzielle Bewertung	61
Literaturverzeichnis	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Abfallhierarchie und deren Herausforderungen	12
Abbildung 2:	Kunststoffabfall am Point of Sale	20
Abbildung 3:	Kunststoffabfall am Point of Sale	21
Abbildung 4:	Prozessablauf Drucktests zur Produktbestimmung.....	24
Abbildung 5:	Drucktest-Modelle aus Recycling-Filament	25
Abbildung 6:	Schematischer Lebenszyklus des Beispielprodukts Göffel	32
Abbildung 7:	Ergebnisse des EF für das Beispielprodukt Göffel	33
Abbildung 8:	Ergebnisse des CO ₂ -Fußabdrucks für das Beispielprodukt Göffel	34
Abbildung 9:	Schematischer Lebenszyklus des Beispielprodukts Rucksackschnalle	35
Abbildung 10:	Ergebnisse des EF für das Beispielprodukt Rucksackschnalle	36
Abbildung 11:	Ergebnisse des CO ₂ -Fußabdrucks für das Beispielprodukt Rucksackschnalle	37
Abbildung 12:	Analyseschritte zur Erforschung des Einsatzes von PHBV im 3D-Druck	39
Abbildung 13:	Unterschiedliche Muster und Strukturen aus TPU	42
Abbildung 14:	Flexibilität von TPU	43
Abbildung 15:	Struktur, Muster und Flexibilität von R-PP	44
Abbildung 16:	Struktur und Muster von R-PS	45
Abbildung 17:	Flexibilität von R-PS	45
Abbildung 18:	Unterschiedliche Muster und Strukturen aus PHB.....	46
Abbildung 19:	Flexibilität von PHB.....	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Status Quo Kunststoffrecycling in der textilen Lieferkette.....	16
Tabelle 2:	Allgemeine Anforderungen und Umsetzbarkeit der Recyclinganlage am PoS.....	22
Tabelle 3:	Ergebnisse der Extrusion von R-PP und R-PS und Verarbeitung im 3D-Druck	23
Tabelle 4:	Kostenkalkulation für die Recyclinganlage im Rahmen des FATM-Konzeptes.....	28
Tabelle 5:	Maschinen zur Herstellung von Recycling-Filament.....	30
Tabelle 6:	Material des Filaments und Prozentsatz im Endprodukt	31
Tabelle 7:	Szenarien für das Beispielprodukt Göffel	32
Tabelle 8:	Masse der Produkte aus dem 3D-Drucker.....	32
Tabelle 9:	Szenarienvergleich für das Beispielprodukt Rucksackschnalle.....	35
Tabelle 10:	Funktionelle Einheit für das Beispielprodukt Rucksackschnalle.....	36
Tabelle 11:	Getestete Kombinationen von Druckparametern für TPU	42
Tabelle 12:	Getestete Kombinationen von Druckparametern für R-PP	43
Tabelle 13:	Getestete Kombinationen von Druckparametern für R-PS	44
Tabelle 14:	Getestete Kombinationen von Druckparametern für PHB.....	46
Tabelle 15:	Beurteilung der getesteten Kunststoffalternativen	47

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
CAD	Computer Aided Design
CSR-RUG	Corporate Social Responsibility-Richtlinie Umsetzungsgesetz
EF	Environmental Footprint
EGD	European Green Deal
FFF-Verfahren	Fused-Filament-Fabrication-Verfahren
HIPS	High Impact Polystyrene
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LDPE	Low Density Polyethylen
NGO	Nichtregierungsorganisation
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PETG	Polyethylenterephthalat modifiziert mit Glykol
PHA	Polyhydroxyalcanoate
PHB	Polyhydroxybuttersäure
PHBV	Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)
PLA	Polylactic Acid
PoS	Point of Sale
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
R-PP	Recyceltes Polypropylen
R-PS	Recyceltes Polystyrol
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
VerpackG	Verpackungsgesetz
VerpackV	Verpackungsverordnung

1 Einleitung

Plastikabfälle verschmutzen Landschaften und Ozeane (Jambeck et al. 2015; Thompson et al. 2009). Die einzigartigen Eigenschaften von Plastik, insb. seine Beständigkeit, stellen gleichzeitig ein großes Problem dar. Kunststoffabfälle zersetzen sich in der Natur nur sehr langsam und zerstören dadurch langfristig globale Ökosysteme (Pinto da Costa et al. 2020). Während Kunststoffverpackungsabfälle und deren Recycling in der Lebensmittelindustrie schon seit längerem im Fokus der Aufmerksamkeit stehen, wird bislang noch häufig unterschätzt, dass auch in der Textilindustrie ein hohes Aufkommen von Kunststoffverpackungen entsteht. Die stark fragmentierte Lieferkette und die empfindlichen Textilien erfordern zumeist Einzelverpackungen aus Kunststoff, um die Produkte vor Schmutz, Schimmel und anderen äußeren Einflüssen auf dem Transportweg zu schützen. In den meisten Fällen ist eine Verringerung der eingesetzten Verpackungen aus Mangel an geeigneten Alternativmaterialien bislang nicht möglich (Frommeyer et al. 2019). Vor diesem Hintergrund gewinnt ein effizienter Recyclingprozess entlang der Lieferkette zunehmend an Bedeutung, um die eingesetzten Verpackungen bestmöglich wiederzuverwerten.

Das Ziel der vorliegenden Ausarbeitung ist es daher, den Status Quo des Recyclings von Kunststoffverpackungen entlang der textilen Wertschöpfungskette aufzuzeigen und darauf aufbauend das Potenzial für ein verbessertes Recycling zu identifizieren. Anschließend werden innovative Ansätze für ein hochwertiges Recycling mittels 3D-Druck-Technologie vorgestellt. Diese umfassen 1) ein betriebswirtschaftliches Konzept für eine Recyclinganlage, welche den am Point of Sale (PoS) anfallenden Kunststoffabfall für den Einsatz im 3D-Druck aufbereitet, (2) eine Analyse der Eignung des bioabbaubaren Kunststoffs Polyhydroxybuttersäure (PHB) zur Verwendung im 3D-Druck sowie (3) Einsatzmöglichkeiten zur Herstellung von Textilien mittels 3D-Druck. Die entwickelten Lösungsvorschläge werden dabei sowohl aus betriebswirtschaftlicher als auch ökobilanzieller Sicht bewertet. Aufbauend auf diesen Analysen werden Handlungsempfehlungen abgeleitet, die dazu beitragen können, langfristig ein effizienteres Kunststoffrecycling in der textilen Lieferkette zu etablieren.

2 Kunststoffrecycling entlang der textilen Lieferkette

2.1 Die Rolle von Kunststoffverpackungen in der textilen Lieferkette

Durch seine zahlreichen Eigenschaften wird Kunststoff heutzutage vielfältig eingesetzt und ist zu einem festen Bestandteil des Alltags geworden (Mwanza & Mbohwa 2017). So werden Kunststoffe z.B. als Folien, Verpackungsmaterial, Einkaufs- und Mülltüten, Spielzeuge sowie in Haushalts- und Industrieprodukten oder in Kleidung verwendet. Verpackungen machen dabei mit 39,9% den größten Anteil von Kunststoffprodukten aus (PlasticsEurope 2018). Problematisch ist hierbei, dass Verpackungen häufig einen kurzen Lebenszyklus haben und oft bereits nach einmaligem Gebrauch entsorgt werden (Ragaert et al. 2017; Al-Salem et al. 2009). Besonders in der Textil- und Bekleidungsindustrie macht sich dieses Problem bemerkbar, denn komplexe und stark vernetzte Lieferketten¹ sind die Regel. Die Transportwege der Textilwaren sind häufig sehr lang (deBrito et al. 2008; Caniato et al. 2012). Zusätzlich führen kleinteilige Arbeitsschritte zu einer starken Fragmentierung der globalen Lieferketten (Seuring & Müller 2008; Caniato et al. 2012). Während der gesamten Wertschöpfungskette eines Textilproduktes fallen somit stetig Verpackungen an. Die Verpackungen dienen der Schutz-, Kennzeichnungs-, Präsentations-, und Transportfunktion (PWC 2018; Kaßmann 2014; VerpackV 1991). Hierfür werden vor allem Verpackungen aus Kunststoffmaterialien eingesetzt. Bei Interesse an der tiefergehenden Bedeutung von Kunststoffverpackungen in der Textilindustrie und deren Vermeidungsmöglichkeiten, wird an dieser Stelle auf den *Business Case „Eine betriebswirtschaftliche Analyse des Vermeidungspotentials von Kunststoffverpackungen innerhalb der textilen Lieferkette“* verwiesen.²

2.2 Recycling von Kunststoffverpackungen entlang der textilen Lieferkette

2.2.1 Die Abfallhierarchie und ihre Problematik

Die Abfallrahmenrichtlinie ist eine der zentralen Richtlinien im Kontext der Abfallwirtschaft und findet sich im deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) wieder. Ein Kernelement der Abfallrahmenrichtlinie bildet die fünfstufige Abfallhierarchie. Der Schutz der Umwelt hat gemäß der Abfallhierarchie die höchste Priorität. Bei der Abfallbewirtschaftung sind Maßnahmen vorzuziehen, die die besten Möglichkeiten für die Sicherung der Umwelt und den Menschen bieten. Hierbei sind sowohl ökologische, soziale als auch wirtschaftliche und technische Auswirkungen zu betrachten (Umweltbundesamt 2019a). An oberster Stelle der Hierarchie steht die Abfallvermeidung. An zweiter Stelle folgt die Vorbereitung zur Wiederverwendung von Kunststoffabfällen, die sich durch die mehrfache Verwendung von Stoffen ohne darauffolgende Verwertung auszeichnet. Nach der Wiederverwendung von Kunststoffen steht in der Abfallhierarchie das Recycling, insbesondere die stoffliche Verwertung von Abfällen. Recycling ist ein Verfahren zur Verwertung, bei dem Abfälle für die ursprüngliche Verwendung oder für andere Zwecke aufbereitet werden (KrWG §3, Abs. 25 2012). Die vorletzte Stufe in der Abfallhierarchie ist die energetische Verwertung, welche die Verbrennung von Kunststoffabfällen zur Energierückgewinnung in Kraftwerken oder Müllverbrennungsanlagen beschreibt (Lindner & Hoffmann 2015). Entscheidend dabei ist, dass durch die Abfallverbrennung mehr Energie

¹ In diesem Text werden die Begriffe „Wertschöpfungskette“ und „Lieferkette“ synonym verwendet.

² Der Bericht ist online abrufbar unter www.fatm.de

zurückgewonnen werden kann, als bei der Verbrennung verbraucht wird (Albrecht & Schwitalla 2015). Die unterste Ebene der Abfallhierarchie bildet die Beseitigung. Aufgrund verschiedener Faktoren, wie z.B. enthaltene Schadstoffe, ist eine vollständige Kreislaufführung und Abfallverwertung von Rohstoffen nicht immer möglich. Bei der Abfallbeseitigung nehmen Deponien eine zentrale Rolle ein. Nach aktuellen Schätzungen reichen in Deutschland die Kapazitäten je nach Deponieklasse noch für ca. 10 bis 20 Jahre (BVSE 2018).

Obwohl Untersuchungen zeigen, dass es fraglich ist, ob die Abfallhierarchie für Kunststoffabfälle optimal ist (Lazarevic et al. 2010; Craighill & Powell 1996), findet eine Anwendung der Hierarchie für alle Abfallarten gleichermaßen statt. Aufgrund verschiedener Faktoren gestaltet sich der Umgang mit Kunststoffabfällen jedoch komplizierter als der Umgang mit anderen Abfällen wie z.B. Glas oder Kartonage (Michaeli et al. 2008). So sind Abfälle aus Kunststoff schlecht abbaubar und gliedern sich daher nicht in den biologischen Kreislauf ein. Auch gemischter oder verschmutzter Kunststoffabfall macht Recycling schwierig. Zwar ist Recycling nachhaltig und ressourcenschonend, allerdings gibt es einen Punkt, ab dem die Erhöhung der Recyclingquote wirtschaftlich und ökologisch nicht sinnvoll ist. Die Grenzen des Recyclings werden dann deutlich, wenn die mit dem Recyclingprozess einhergehende Verunreinigung des Kunststoffes die mit dem Recycling verbundenen Einsparungen übersteigt und heterogene Abfälle das Recycling komplex und teuer machen (Baum & Pehnelt 2017).

Die Relevanz der Kunststoffabfall-Problematik zeigt sich darin, dass die Europäische Union den Umgang mit Kunststoffabfällen zu einem der Schlüsselthemen des im Jahr 2018 erschienenen Aktionsplans „Circular Economy Package“ machte (European Commission 2018a). Anstatt linearer Systeme sollen bei der Circular Economy hochwertige und geschlossene Kreisläufe für Materialien geschaffen werden (Korhonen et al. 2018). Durch den Kreislauf können bestehende Materialien wiederverwertet und auf die Verwendung von neuen Rohstoffen verzichtet werden. In der Circular Economy sollen mithilfe eines „Closed-Loop“-Recyclings (geschlossener Kreislauf) bestenfalls gleichwertige, zumindest aber hochwertige Produkte hergestellt werden (Geissdoerfer et al. 2017). Im Gegensatz dazu werden beim „Open-Loop“-Recycling (offener Kreislauf) minderwertige Produkte hergestellt (Ragaert et al. 2017). Dies wird auch als „Downcycling“ bezeichnet (Iacovidou et al. 2017). In Abbildung 1 wird die Abfallhierarchie dargestellt und die damit verbundenen Problematiken und Herausforderungen aufgezeigt.

Abfallhierarchie und Problematik

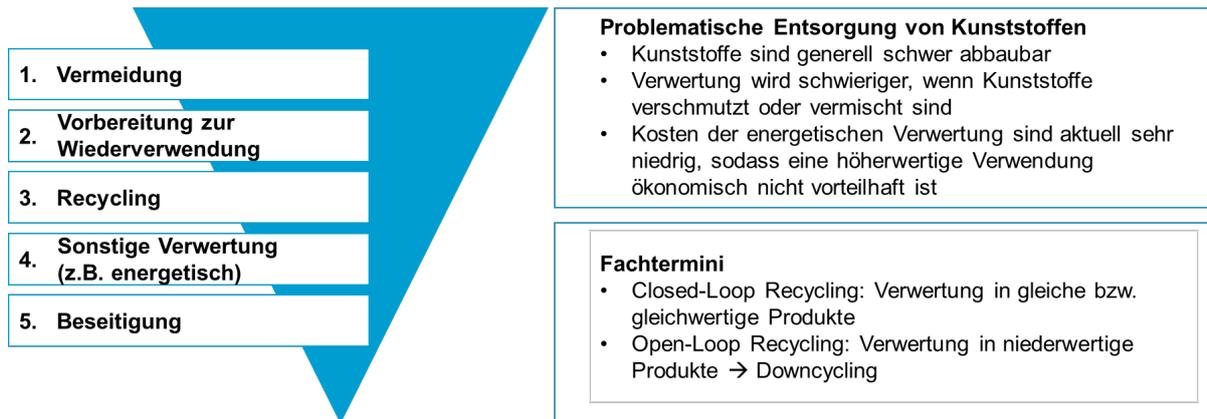


Abbildung 1: Abfallhierarchie und deren Herausforderungen

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis des KrWG §6

2.2.2 Gesetzliche Vorgaben zum Kunststoffrecycling

In Deutschland bildet das KrWG die Grundlage für das Kunststoffrecycling. Auf diesem Gesetz beruht auch das zum Jahresbeginn 2019 in Kraft getretene Verpackungsgesetz (VerpackG) (Umweltbundesamt 2019a). Das VerpackG soll die Auswirkungen von Verpackungsabfällen auf die Umwelt vermeiden oder verringern (VerpackG §1 Abs. 1). Mit Inkrafttreten des Gesetzes gelten unter anderem höhere Recyclingquoten (VerpackG §16 Abs. 2). Diese erhöhten Quoten sollen die Recyclingwirtschaft unter Druck setzen, die Entwicklungen im Kunststoffrecycling zu beschleunigen (Rothgang et al. 2017). Die in §21 VerpackG beinhaltete „ökologische Gestaltung der Lizenzentgelte“ bietet einen Anreiz, die Recyclingfähigkeit bei der Produktgestaltung zu berücksichtigen. Demnach sollen Lizenzentgelte zur Verwendung dualer Systeme anhand ökologischer Kriterien festgelegt werden (VerpackG §21). Initial wurde das duale System durch die Verpackungsverordnung (VerpackV) eingeführt, um die Rücknahme und Verwertung von Verkaufsverpackungen zu regeln (VerpackV §6 Abs. 3; Rothgang et al. 2017). Hersteller und Vertreiber von Verpackungen werden in die Pflicht genommen, für Entsorgung der in Verkehr gebrachten Verpackungen zu zahlen und werden dazu angehalten, hochwertig verwertbare Erzeugnisse herzustellen (KrWG §23 & §25 Abs. 1). Die Lizenzkosten für die Registrierung von Verpackungen in dualen Systemen sollen umso niedriger sein, je stärker der Aspekt der Wiederverwendbarkeit im Produktdesign berücksichtigt wird (VerpackG §21; Humml 2018). Konsumenten sollen beim Einkaufen dazu motiviert werden, Mehrwegverpackungen gegenüber Einwegverpackungen zu bevorzugen. Zu diesem Zweck wird der Handel durch das VerpackG dazu verpflichtet, am Point of Sale (PoS) die Differenzierung zwischen Einweg- und Mehrwegverpackungen kenntlich zu machen (VerpackG §32 Abs. 1).

Im VerpackG ist durch die Stiftung Zentrale Stelle, die im Rahmen des VerpackG ins Leben gerufen wurde, eine jährliche Veröffentlichung von Mindeststandards für die einheitliche Bemessung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen vorgesehen. Die erstmalige Veröffentlichung erfolgte am 01.09.2019 und ist auf der Website der Stiftung Zentrale Stelle einsehbar (Stiftung Zentrale Stelle 2019a). Die jährlich neu definierten Mindeststandards sollen bewirken, dass Handelsunternehmen die Verpackungshersteller unter Druck setzen, Verpackungsarten schnell abzuändern, damit die Standards vollumfänglich gewährleistet werden können

(Stiftung Zentrale Stelle 2019b). Für die Bemessung der Recyclingfähigkeit wird der Wertstoffgehalt einer Verpackung analysiert. Der für das Recycling notwendige Wertstoffgehalt wird anhand folgender drei Mindestanforderungen ermittelt: (1) Sortier- und Verwertungsinfrastrukturen für hochwertiges werkstoffliches Recycling der entsprechenden Verpackung, (2) Sortierbarkeit der zu recycelnden Verpackung und Trennbarkeit in ihre Bestandteile sowie (3) ggf. Unverträglichkeiten von Verpackungsbestandteilen, die die Verwertung verhindern oder vermindern können (Stiftung Zentrale Stelle 2019a).

Seit der Einführung des VerpackG zog die Stiftung Zentrale Stelle bereits eine erste positive Zwischenbilanz. So hat sich die Anzahl der Registrierungen von Unternehmen im Verpackungsregister LUCID seit 2016 verdreifacht. Dennoch besteht weiterhin Verbesserungspotenzial bei der Systembeteiligung, insbesondere im Bereich der Leichtstoffverpackung, worunter auch Kunststoff fällt. Trotz der neugeschaffenen Rechtsklarheit durch einen Katalog von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen kommen nicht alle betroffenen Unternehmen ihrer Produktverantwortung nach (Stiftung Zentrale Stelle 2019b). Bei diesen Unternehmen fordert die Zentrale Stelle nun konsequent die Umsetzung der Systembeteiligung durch die Erhebung von Bußgeldern ein (Süddeutsche Zeitung 2019).

2.2.3 Einflussfaktoren auf das Kunststoffrecycling entlang der textilen Lieferkette

Um den Status quo des Kunststoffrecyclings in der Textilindustrie zu ermitteln, wurde in einem ersten Schritt analysiert, welche Faktoren die Recyclingaktivitäten entlang der Lieferkette im Allgemeinen beeinflussen. Während Kunststoff in der Modeindustrie lange Zeit insbesondere in Form von Kunststofffasern eine Rolle spielte (Ellen McArthur Foundation 2017), steht mittlerweile auch der aus dem hohen Bedarf von Verpackungen resultierende Kunststoffabfall im Mittelpunkt. 2018 wurde durch das UN Environment Programme in Kooperation mit der Ellen MacArthur Foundation das „New Plastics Economy Global Commitment“ zur Bekämpfung von Kunststoffabfällen eingeführt. Mehrere große Unternehmen in der Modeindustrie wie z.B. die H&M Group bekennen sich im Rahmen der Initiative dazu, bis 2025 Verpackungen zu eliminieren, die nicht wiederverwendbar, recycelbar oder kompostierbar sind (Ellen MacArthur Foundation & UN Environment Programme 2019).

Allgemein wird das Recycling von Verpackungen als Bestandteil der nachhaltigen Entwicklung innerhalb der Modeindustrie hauptsächlich von internen, marktbasieren und regulatorischen Einflussfaktoren sowie dem Einfluss von Nichtregierungsorganisationen (NGOs) bestimmt (Caniato et al. 2012; Seuring & Müller 2008; Li et al. 2014). Bei den internen Einflussfaktoren zählen Unternehmenswerte, z.B. eine Fokussierung auf verringerte Ressourcennutzung, als Treiber. Demgegenüber stehen Kosten als Hindernisse für eine nachhaltige Entwicklung (Caniato et al. 2012). Die energetische Verwertung weist derzeit so niedrige Kosten auf, dass höherwertige Verfahren, wie z.B. Recycling, im Vergleich häufig unwirtschaftlich sind (DGAW 2015). Dies steht der Umsetzung eines hochwertigen Recyclings in der textilen Lieferkette entgegen. Weitere Hemmnisse für ein hochwertiges Kunststoffrecycling sind die globalen Recyclingmärkte (Umweltbundesamt 2016a) und die niedrigen Ölpreise, da beide Faktoren eine kostengünstige Produktion von Primärkunststoff begünstigen (Umweltbundesamt 2016b). Aus ökonomischer Perspektive scheint Kunststoff deshalb zumindest kurzfristig das optimale Verpackungsmaterial in der textilen Lieferkette zu sein (Frommeyer et al. 2019). Der Einsatz von Recyclingverpackungen ist zum aktuellen Zeitpunkt weniger wirtschaftlich als die Verwendung von Verpackungen aus Primärkunststoff.

Marktbasierte Einflussfaktoren sind von Industrie- und Endkunden gestellte Anforderungen (Caniato et al. 2012). Industriekunden könnten Energiesparmaßnahmen oder Recyclingquoten als Anforderung stellen. Die Analysen im Rahmen des Projekts zeigen jedoch, dass seitens der Akteure in der textilen Lieferkette kaum Anforderungen in Bezug auf Recycling von Verpackungsmaterialien wahrgenommen werden. Auch der Einfluss der Endkunden ist bislang eher gering.³ Dies könnte auch darauf zurückzuführen sein, dass häufig eine Diskrepanz zwischen der geäußerten Absicht und der tatsächlichen Umsetzung des Nachhaltigkeitsgedankens aufseiten der Verbraucher besteht (Goworek 2011; BTE et al. 2015).

Regulatorische Einflussfaktoren beziehen sich auf aktuelle oder zukünftige gesetzliche Regelungen (Caniato et al. 2012). Im Vergleich zu anderen Industrien ist die Gesetzgebung in der Modeindustrie jedoch bislang weniger streng (Caniato et al. 2012). Zudem ist die textile Lieferkette global verteilt (Seuring & Müller 2008; Caniato et al. 2012), weswegen die Kreisläufe des Kunststoffrecyclings durch die nationale Gesetzgebung nur schwer beeinflussbar sind. Zwar verpflichtet das Corporate Social Responsibility-Richtlinie Umsetzungsgesetz (CSR-RUG) in Deutschland Großunternehmen zu einer nicht-finanziellen Berichterstattung (CSR-RUG 2017), konkrete Inhaltsvorgaben werden aber nicht gemacht. Außerdem existieren in der deutschen Modeindustrie hauptsächlich kleine- und mittelständische Unternehmen (Gesamtverband textil+mode 2017), die nicht dazu verpflichtet sind, das Gesetz zu implementieren (CSR-RUG 2017). Regulatorische Eingriffe, wie das VerpackG, können zwar helfen, Lücken in der Verwertung von Kunststoffabfällen zu schließen und Anreize zur Verwendung von nachhaltigen Verpackungen zu setzen (Stiftung Zentrale Stelle 2019b). Darüber hinaus gelten die rechtlichen Bestimmungen bislang jedoch nur für einen kleinen Anteil der Textilunternehmen und bleiben zumeist unkonkret.

Kampagnen von NGOs spielen eine immer wichtigere Rolle bei der Entwicklung nachhaltiger Geschäftskonzepte in der Modeindustrie (Grappi et al. 2017; Lorek & Spangenberg 2014). Wenn NGOs öffentlich Missstände von Unternehmen in der Modeindustrie anprangern, kann dies durch eine Image-Schädigung negative wirtschaftliche Folgen für betroffene Unternehmen haben (Grappi et al. 2017). Auch in Bezug auf den Einsatz von Kunststoffverpackungen und deren Recycling wäre eine effektive Einflussnahme seitens der NGOs denkbar, bislang ist dies jedoch nicht beobachtbar.

2.2.4 Situation am Point of Sale

Zur Erfassung der Situation am PoS wurden im Rahmen des Projektes insgesamt 12 qualitative Interviews mit Bekleidungseinzelhändlern geführt. Die Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass der Handel ein ineffektives und ineffizientes Recycling von Kunststoffverpackungen am PoS beklagt. Problematisch ist aus Sicht der Befragten, dass jeder Hersteller eine individuelle Verpackungslösung wählt. Dadurch entstehen am PoS viele Verpackungsabfälle aus unterschiedlichen Materialien. Für die Händler ist es dadurch zu schwierig und zeitaufwändig, die jeweilige fachgerechte Entsorgungsart der unterschiedlichen Verpackungen zu identifizieren. Aufgrund dieser hohen Komplexität werden Kunststoffverpackungen vor der Entsorgung zumeist nicht sortenrein getrennt. Wenn eine sortenreine Trennung in Kunststoffe möglich ist, werden diese in der Regel über die Wertstofftonne entsorgt. Können Abfälle jedoch aufgrund

³ Erkenntnisse aus den im Rahmen des Projektes VerPlaPoS geführten Experteninterviews.

von Verschmutzung bzw. dem hohen Aufwand nicht entsprechend getrennt werden, erfolgt regelmäßig auch eine Entsorgung über den Restmüll.

Insbesondere in Bezug auf Kleiderbügel sehen die Befragten ein großes Potenzial für ein hochwertiges Recycling. Viele Hersteller versenden ihre Produkte als Hängeware und nutzen dafür Kleiderbügel aus Kunststoff. Alternativ werden Produkte als Liegeware versendet. Auch hier wird jedoch zuweilen ein Kleiderbügel aus Kunststoff zur Präsentation der Ware am PoS mitgeliefert. Da viele Händler eigene Kleiderbügel für eine einheitliche Warenpräsentation nutzen, werden die mitgelieferten Kleiderbügel der Hersteller in der Regel umgehend entsorgt. Doch auch in dem Fall, dass die Händler die zur Verfügung gestellten Kleiderbügel für die Warenpräsentation nutzen, kommt es zu einem hohen Aufkommen von Kunststoffabfällen. Die von den Herstellern mitgelieferten Kleiderbügel aus Kunststoff sind weniger stabil als solche aus Holz und zerbrechen insb. unter der Last schwerer Winterware häufig. Kleiderbügel bestehen zumeist aus reinem Polyethylen oder Polypropylen und bieten hervorragende Voraussetzungen für ein hochwertiges, sortenreines Recycling. Dieses Potenzial geht jedoch verloren, da die Mehrheit der befragten Händler Kunststoffabfälle über die Wertstoffsammlung entsorgt, innerhalb derer eine sortenreine Trennung unterschiedlicher Kunststoffe nicht vorgesehen ist. Zwar gibt es für Kleiderbügel bereits bestehende Recyclingkreisläufe, diese werden jedoch hauptsächlich auf den vorgelagerten Stufen der Lieferkette, z.B. im Zentrallager, genutzt. Der stationäre Einzelhandel ist in die Rücknahmesysteme häufig nicht eingebunden. Anders verhält es sich bei Kunststoffverpackungen wie z.B. Polybags oder Stretchfolie. Diese sind häufig durch Aufkleber oder andere Störstoffe wie Beschriftungen oder Silikagele verunreinigt. Eine sortenreine Trennung in die unterschiedlichen Materialbestandteile ist für das Personal am PoS im Tagesgeschäft zu zeitaufwändig, sodass diese Verpackungen aktuell aufgrund des hohen Verschmutzungsgrads ohne eine vorherige Trennung entweder über die Wertstoffsammlung oder bei starker Verschmutzung über den Restmüll entsorgt werden.⁴

2.2.5 Herausforderungen des Kunststoffrecyclings

Gemäß der Abfallhierarchie des KrWG ist das Recycling gegenüber der sonstigen Verwertung und der Beseitigung vorzuziehen. Trotzdem werden in Deutschland Abfälle aus Kunststoff noch überwiegend energetisch verwertet. Seit Jahren stagniert das Kunststoffrecycling auf einem niedrigen Niveau (Umweltbundesamt 2021). Zwar sind die offiziell angegebenen Recyclingquoten in Deutschland hoch, diese beziehen sich jedoch nicht auf den tatsächlich recycelten Output. Von Post-Consumer-Kunststoff wird in Deutschland nur knapp 16% zu Rezyklaten verarbeitet (Heinrich-Böll-Stiftung & Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland 2019). Der Umgang mit Abfällen aus Kunststoff gestaltet sich komplizierter als der Umgang mit anderen Abfällen, wie Glas oder Kartonage (Michaeli et al. 2008). Zum einen sind Abfälle aus Kunststoff schlechter abbaubar und gliedern sich daher nicht in den biologischen Kreislauf ein. Zusätzlich erschwert eine hohe Heterogenität des Kunststoffabfalls das Recycling. Gemischter oder verschmutzter Kunststoffabfall macht Recycling nicht nur komplex und teuer, sondern schränkt auch die Wiederverwendbarkeit von Rezyklaten ein. Die mangelhafte Abfalltrennung ist ein zentraler Faktor für die geringen Mengen an recycelten Abfällen aus Kunststoffen (Baum & Pehnelt 2017). Zudem endet Recycling von Kunststoffen meist im Downcycling. Heterogene und stark verschmutzte Kunststoffabfälle werden eingeschmolzen und Produkte von minderer Qualität, wie bspw. Lärmschutzwände oder Kunststoffplatten, erzeugt (Tieke 2014;

⁴ Erkenntnisse aus den im Rahmen des Projektes VerPlaPoS geführten Experteninterviews.

Lindner & Hoffmann 2016). Hersteller bevorzugen daher für ihre Produkte häufig noch Primärkunststoffe (Heinrich-Böll-Stiftung & Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland 2019). Damit höhere Recyclingquoten auch zu einer besseren Circular Economy führen können, besteht laut dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) die Herausforderung, einen verlässlichen Rezyklate-Markt zu etablieren (BMU 2019). Ökonomisch gesehen ist jedoch der Einsatz von neuwertigen Kunststoffen zur Herstellung von Verpackungen wegen des aktuell niedrigen Ölpreises bislang kostengünstiger als die Verwendung von Rezyklaten. Dies könnte zu einer Nicht-Erreichung der im Rahmen des VerpackG vorgegebenen Recyclingquoten führen (Stiftung Zentrale Stelle 2020). Auch in Bezug auf das Recycling von Polybeuteln in der textilen Lieferkette ist der Grad an Verunreinigung problematisch. Störstoffe wie Metallreste, Silikagele und vor allem Papieretiketten behindern eine hochwertige Verwertung.

Die in Kapitel 2.2 erläuterten Aspekte zum Status Quo des Kunststoffrecyclings in der textilen Lieferkette werden in Tabelle 1 zusammengefasst:

Tabelle 1: Status Quo Kunststoffrecycling in der textilen Lieferkette

Abfallhierarchie und gesetzliche Vorgaben
<ul style="list-style-type: none"> - Recycling gem. Abfallhierarchie dritthöchste Priorität zur Abfallverwertung - Gesetzliche Regelungen gem. KrWG und VerpackG zur Steigerung der Recyclingquoten
Einflussfaktoren auf das Recycling
<ul style="list-style-type: none"> - Intern: Kosten und Image größte Treiber und Hindernisse - Marktgetrieben: Anforderungen von Industriekunden und Endverbrauchern - Regulatorisch: Geringe Wahrnehmung, langsame und teilweise problematische Umsetzung von Gesetzen, Überlegenheit von Unternehmen - NGOs: Mögliche Gewinnschmälerung durch Imageschädigung
Situation am Point of Sale
<ul style="list-style-type: none"> - Hersteller wählen individuelle Verpackungslösungen aus unterschiedlichen Materialien - Erkennen der jeweiligen Kunststoffart für ungeschultes Personal schwierig - Sortenreine Trennung zu zeitaufwändig - Infrastrukturen für getrennte Sammlung verschiedener Kunststoffmaterialien nicht vorhanden - Hoher Verschmutzungsgrad von Polybeuteln führt zu Entsorgung über den Restmüll
Herausforderungen
<ul style="list-style-type: none"> - Hoher Verschmutzungsgrad der Verpackungen erschwert hochwertiges Recycling - Fehlende Infrastrukturen verhindern sortenreines Recycling von z.B. Kleiderbügeln - Hohe Kosten für Recyclingverpackungen im Vergleich zu Verpackungen aus Primärkunststoff

Quelle: Eigene Darstellung

3 Ansätze zur Verbesserung des Recyclings entlang der textilen Lieferkette mittels 3D-Druck

3.1 Betriebswirtschaftliches Konzept für den Betrieb einer Recyclinganlage für Kunststoffabfälle am Point of Sale

3.1.1 Erläuterung Grundidee

Im Folgenden wird das Konzept einer Recyclinganlage für Kunststoffabfälle am PoS unter Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher und ökobilanzieller Kriterien entwickelt. Wie zuvor erläutert, besteht in Bezug auf die Recyclinginfrastrukturen für Kunststoffabfälle im stationären Handel Verbesserungsbedarf. Die im Folgenden skizzierte Recyclinganlage umfasst sowohl eine Extrusions-Anlage zur Filament-Herstellung als auch einen 3D-Drucker und ermöglicht somit das Recycling von Kunststoffabfällen und die Herstellung neuer Produkte direkt vor Ort beim Händler. Hierzu wird am PoS anfallender Kunststoffabfall gesammelt, sortenrein getrennt und in einem ersten Schritt zu Granulat und anschließend zu Filament verarbeitet. Das Filament kann vor Ort im 3D-Druck zur Herstellung von individualisierten Produkten oder Ersatzteilen genutzt werden, wie z.B. Ersatz-Schnallen für Rucksäcke. Der angestrebte Nutzen der konzipierten Recyclinganlage umfasst drei wesentliche Aspekte. Zum einen ermöglicht sie dem Handel eine effiziente Nutzung von Kunststoffabfällen direkt am PoS. Gleichzeitig werden Verbraucher für die Thematik Kunststoffabfall sensibilisiert, indem die Sichtbarkeit der Kunststoffabfälle gesteigert wird. Zuletzt können vor Ort individualisierte 3D-Druck Produkte für die Kunden hergestellt werden. Die Kunden profitieren somit von einer verbesserten Verfügbarkeit von bspw. Ersatzteilen und Händler können während der Wartezeit im Geschäft möglicherweise zusätzlichen Umsatz generieren.

3.1.2 Allgemeine Anforderungen an die praktische Umsetzbarkeit des Konzepts

Die im Folgenden dargestellten Anforderungen an einen geeigneten Standort der Recyclinganlage am PoS wurden in Kooperation mit dem 3D-Druck Unternehmen Urbanmaker entwickelt, welches langjährige Erfahrung im Bereich der additiven Fertigung besitzt. Alle getroffenen Annahmen basieren auf Einschätzungen von Experten im Bereich 3D-Druck mittels Fused-Filament-Fabrication-Verfahren (FFF-Verfahren).

Anforderungen an den Standort:

- Grundsätzlich sollte die Recyclinganlage an einem trockenen Ort mit wenig Staubbildung aufgestellt werden. Der Untergrund sollte stabil sein.
- Eine professionelle Extrusions-Anlage umfasst ca. 30m² inkl. Sicherheitsabstand (Umfang der Anlage ca. 12m x 1m x 2,5m (L x B x H)). Es existieren zwar neuartige Extrusions-Anlagen für den Heimgebrauch, welche nur eine Fläche von ca. 1m² benötigen, solche Anlagen genügen jedoch bislang nicht den Anforderungen an die konzipierte Recyclinganlage.
- Eine Extrusions-Anlage mit den o.g. Maßen benötigt Starkstrom.
- Für eine reibungslose Infrastruktur sollte für den 3D-Drucker eine stabile WLAN-Verbindung existieren mit mindestens 50 Mbit/s Upload- und 30 Mbit/s Downloadgeschwindigkeit.

Anforderungen an den Kunststoffabfall am PoS:

- Für das Recycling im 3D-Druck Verfahren muss eine sortenreine Trennung der am PoS anfallenden Kunststoffabfälle möglich sein. Sie sollten außerdem einen niedrigen Verschmutzungsgrad und eine geringe Anzahl an Störstoffen aufweisen. Um ein effektives Recycling durch die Anlage zu gewährleisten, sollte eine monatliche Mindestmenge an Kunststoffabfall erreicht werden. Diese liegt Expertenschätzungen zufolge bei etwa 25kg Granulat. Bei einem durchschnittlichen Gewicht von 60g pro Kleiderbügel entspricht dies einer monatlichen Mindestmenge von etwa 417 Kleiderbügeln, oder, bei einem durchschnittlichen Gewicht von 5g pro Polybeutel (DIN A4), einer monatlichen Mindestmenge von 5.000 Polybeuteln.

Technische Anforderungen:

- Da die Anlage das Kunststoffrecycling am PoS erleichtern und somit die direkte Weiterverarbeitung am PoS ermöglichen soll, ist es zunächst notwendig, die verschiedenen Kunststoffqualitäten zu sortieren und voneinander zu trennen. Zu den gängigen Kunststoffqualitäten von Verpackungen zählen Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) und Polyethylen (PE).⁵ Eine automatische Sortierung der Abfälle durch die Anlage ist anzustreben.

Anforderungen an das Personal:

- Die Mitarbeiter am PoS werden für die Bedienung der Recyclinganlage am PoS zuständig sein. Dazu gehören das Erstellen, Ändern und Korrigieren von für den 3D-Druck notwendigen Computer Aided Design (CAD)-Dateien, die fachgerechte Säuberung und Reinigung der Anlage und ein praktisches Verständnis über die allgemeinen Bedienungsabläufe der Anlage. Dazu zählen: Anschalten, Einspeisen der entsprechenden Kunststoffverpackungen, Überwachung der Produktionsschritte innerhalb der Anlage, Hochladen von CAD-Dateien über einen mobilen Rechner, Einsetzen des passenden Filaments, Überwachung des 3D-Drucks und Entnahme des 3D-Drucks. Hinzu kommt ein grundlegendes Verständnis und die Kenntnis von Lösungen bei nicht-schwerwiegenden Betriebsproblemen der Anlage.
- Zuletzt übernehmen die Mitarbeiter am PoS auch zusätzliche Aufklärungs- und Beratungsleistungen gegenüber den Kunden. Dazu zählen die Aufklärung und Informationsweitergabe über Kunststoffverpackungen in der textilen Lieferkette, sowie Beratungsleistungen gegenüber Kunden über Möglichkeiten und Einsatzbereiche von 3D-Druck.

3.1.3 Analyse der praktischen Umsetzbarkeit des Konzepts

Die praktische Umsetzbarkeit der Recyclinganlage am PoS ist abhängig davon, ob die zuvor vorgestellten Anforderungen erfüllt werden können und ob die Herstellung von Recycling-Filament aus Kunststoffabfällen vom PoS technisch möglich ist. Daher wurde zunächst überprüft, ob die im Kapitel 2.1.2 erläuterten Anforderungen an den Betrieb der Recyclinganlage am PoS erfüllt werden können. Anschließend wurden Untersuchungen zur Wiederverwendbarkeit des am PoS anfallenden Kunststoffabfalls durchgeführt. Hierzu wurden die Recyclingmöglichkeiten

⁵ PE wird insbesondere in zwei unterschiedlichen Varianten genutzt, dem sog. Low Density Polyethylen (LDPE) und dem High Density Polyethylen (HDPE).

ten von Polybags und Kleiderbügeln und deren Verwendung im 3D-Druck analysiert. Anschließend wurden Möglichkeiten und Grenzen des 3D-Drucks erprobt und mögliche Produkte zur Herstellung mittels 3D-Druck am PoS und deren Akzeptanz bei Händlern getestet.

Beurteilung des Erfüllungsgrads der allgemeinen Anforderungen an den Betrieb der Recyclinganlage:

Anforderungen an den Standort:

Der Flächenbedarf von 30m² überschreitet die vorhandenen Raumkapazitäten im stationären Einzelhandel erheblich. Da die Mietpreise für Gewerbeflächen in Innenstadtlage grundsätzlich hoch sind, muss jeder Quadratmeter als Verkaufsfläche genutzt werden. Eine Verkleinerung der Verkaufsfläche ist aus Sicht des Einzelhandels max. im Umfang von 4m² möglich. Allein aufgrund der räumlichen Anforderungen ist eine Umsetzung der Recyclinganlage am PoS nicht möglich, auch wenn die übrigen Standortbedingungen in Bezug auf WLAN und Starkstrom realisiert werden könnten.

Anforderungen an den Kunststoffabfall am PoS:

Die Anforderungen an die benötigten Mengen von Kunststoffabfällen am PoS können von einem einzigen Einzelhändler allein nicht erfüllt werden. Der Bedarf von 417 Kleiderbügeln oder 5.000 Polybeuteln pro Monat überschreitet die tatsächlich anfallenden Abfallmengen am PoS erheblich. So haben Recherchen in Zusammenarbeit mit den Praxispartnern ergeben, dass dort jährlich eine Abfallmenge von ca. 2.000 Kleiderbügeln und ca. 26.000 Polybags entsteht. Somit kann der monatliche Mindestbedarf für den Betrieb der Recyclinganlage von einem Einzelhändler allein nicht gedeckt werden.

Analyse des Kunststoffabfalls aus Polybags:

Zunächst wurde die Eignung von Abfällen aus Kunststofffolie zur Herstellung von 3D-Druck-Filament analysiert. Dabei handelte es sich insb. um Polybags, welche typischerweise am PoS anfallen. Hierzu wurden die gesammelten Abfälle der Praxispartner in einem ersten Schritt sortiert. Folgende Kunststoffe waren enthalten: 2330g PP, 506g HDPE, 1507g LDPE. Des Weiteren konnte die Materialart von 922g Kunststoff nicht festgestellt werden. Zusätzlich befanden sich 8g Papier zwischen den Abfällen, z.B. in Form von Aufklebern. Abbildung 2 zeigt den untersuchten Kunststoffabfall am PoS.



Abbildung 2: Kunststoffabfall am Point of Sale

Quelle: Eigene Aufnahme

Die Erforschung der Umsetzbarkeit einer 3D-Druck basierten Wiederverwertung von Polybags ergab, dass die Sortenreinheit bei Polybags nicht gewährleistet ist und Polybags manuell von Störstoffen befreit werden müssen. Hierzu wurde ein praktischer Test durchgeführt, um die Dauer der Trennung von Aufklebern auf Polybags zu messen: Für die Trennung von Aufklebern auf 132 Polybags aus LDPE werden im Durchschnitt 22 Minuten benötigt. Dieser manuelle Aufwand macht den Prozess unwirtschaftlich.

Auch unter der Annahme, dass Sortenreinheit effizient gewährleistet werden könnte, wäre eine Verarbeitung von Polybags zu Granulat nur mit entsprechenden Spezialmaschinen möglich. Zudem ist die hier hauptsächlich eingesetzte Folie chemisch für eine möglichst hohe Zugkraft und Reißfestigkeit ausgelegt, diese Faktoren sind jedoch kontraproduktiv für das Extrudieren im FFF-3D-Druck-Verfahren, da hier schnelle Durchflusswerte für eine schnelle Verarbeitung benötigt werden.

Die durchgeführten Analysen lassen darauf schließen, dass Polybags und Kunststofffolien für die Aufbereitung und Weiterverarbeitung in einer Recyclinganlage am PoS mit dem aktuellen Stand der Technik nicht geeignet sind.

Analyse des Kunststoffabfalls aus Kleiderbügel:

Des Weiteren wurden die aussortierten Kleiderbügel eines Praxispartners analysiert, welche typischerweise im Laufe des Transport- und Verkaufsprozesses beschädigt und entsorgt werden. Die Materialart der aussortierten Kleiderbügel setzte sich aus 1780g PP und 1910g PS, sowie 415g Metall zusammen. Die Kleiderbügel sind grundsätzlich für die Aufbereitung und Weiterverarbeitung in einer Recyclinganlage am PoS geeignet. Abbildung 3 zeigt verschiedene Beispiele der am PoS aussortierten Kleiderbügel.



Abbildung 3: Kunststoffabfall am Point of Sale

Quelle: Eigene Aufnahmen

Technische Anforderungen:

Eine automatische Sortierung der Abfälle vom PoS ist mit dem aktuellen Stand der Technik bislang nicht umsetzbar. Da diese technische Anforderung bisher nicht erfüllt werden kann, muss die Sortierung am PoS manuell erfolgen und wird im nächsten Abschnitt *Anforderungen an das Personal* näher spezifiziert.

Darüber hinaus können Mischformen von Kunststoffabfall derzeit noch nicht berücksichtigt werden, da die technischen Voraussetzungen für das Erkennen und Trennen von Mischformen, die miteinander verschmolzen sind, nicht gegeben sind. Eine Weiterverarbeitung von miteinander verschmolzenen Mischformen ist im FFF-Verfahren nach bisherigem Kenntnisstand technisch noch nicht umsetzbar.

Anforderungen an das Personal:

Aufgrund der komplexen Tätigkeiten im Zusammenhang mit der Bedienung der Recyclinganlage können die Anforderungen an das Personal nur nach umfassender Schulung der Mitarbeiter oder durch Einstellung neuer Mitarbeiter mit entsprechenden Kenntnissen gewährleistet werden. Wie im Abschnitt „Technische Anforderungen“ bereits erwähnt, ist die sortenreine Trennung verschiedener Kunststoffqualitäten eine Voraussetzung für den Betrieb einer Recyclinganlage am PoS. Da die Sortierung von Mitarbeitern am PoS vorgenommen werden muss, müssen diese über die entsprechenden Kenntnisse der verschiedenen Kunststoffqualitäten verfügen. Sie müssen in der Lage sein, verschiedene Kunststoffqualitäten (Rein- sowie Mischformen) zu erkennen, zu benennen und zu trennen. Darüber hinaus müssen die Mitarbeiter in Bezug auf alle technischen Details der Recyclinganlage geschult werden.

In Tabelle 2 werden die allgemeinen Anforderungen an eine Recyclinganlage am PoS und die jeweilige Beurteilung der Umsetzbarkeit gegenübergestellt.

Tabelle 2: Allgemeine Anforderungen und Umsetzbarkeit der Recyclinganlage am PoS

	Anforderungen am PoS	Umsetzbarkeit am PoS
Standort	<ul style="list-style-type: none"> • 30m² Fläche • Trockener Untergrund • Starkstrom vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> • Maximale Fläche: 4m² • Trockener Untergrund und Starkstrom vorhanden
Kunststoffabfälle	<ul style="list-style-type: none"> • Monatl. Mindestmenge an Abfall: 417 Kleiderbügel oder 5.000 Polybeutel 	<ul style="list-style-type: none"> • Monatl. Abfallmenge von einem Praxispartner nicht ausreichend • Aufbereitung und Weiterverarbeitung von Kunststoffabfall: <ul style="list-style-type: none"> ○ Polybags: Technisch und wirtschaftlich aktuell nicht möglich ○ Kleiderbügel: Technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit gegeben
Abfallsortierung	Automatische Sortierung ideal	Sortierung lediglich manuell möglich
Mitarbeiter am PoS	Verantwortlich für: <ul style="list-style-type: none"> • Bedienung der Maschinen • Beratung und Verkauf • Verbraucheraufklärung 	Gewährleistet durch Schulungen zu <ul style="list-style-type: none"> • Bedienung der Maschinen • Beratung und Verkauf • Verbraucheraufklärung

Quelle: Eigene Darstellung

Analyse der technischen Umsetzbarkeit:

Analyse Herstellung von Filament aus recyceltem Polypropylen (R-PP):

Im Rahmen der Analyse wurden die Kleiderbügel (ohne Metallhaken) zunächst gesäubert und geschreddert. In einem weiteren Schritt wurde das geschredderte PP und PS granuliert und extrudiert.

Bei der Extrusion des R-PP gab es keine Probleme. Die Druckparameter entsprechen den Standardeinstellungen für PP-Granulat. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass R-PP einfach reproduzierbar ist. Die Materialzusammensetzung des R-PP bestand somit aus 100% recycelten Kleiderbügel. Die Ausbringungsmenge des R-PP betrug 2 x 800 g.

Die Extrusion des R-PP Filaments wurde mit einer Temperatur von 250-255°C durchgeführt. Die Druckbett-Haftung beim Druck mit R-PP konnte als gut eingestuft werden. Die beste Druckbett-Haftung konnte auf einer Beschichtung des Herstellers tefka mit den Charakteristika BRIM 30L und 90°C generiert werden. Nicht möglich war der Druck auf sonst im FFF-Verfahren gängigen Materialien wie Glas, BuidTak und MT-Plus. Die Darstellung der Auflösung mit 0,2 mm Schichthöhe, was den gängigsten Einstellungen des FFF-Verfahrens entspricht, war gut. Die Prozess-Stabilität während des Drucks war im direkten Vergleich mit etablierten Materialien jedoch eher im unteren Bereich.

Analyse Herstellung von Filament aus recyceltem Polystyrol (R-PS):

Die Extrusion des R-PS ist nicht problemlos möglich. Laut den Prägestempeln auf den Kleiderbügeln handelte es sich um reines Styrol. Dieses Material ist grundsätzlich für ein Filament zu hart und zu spröde. Für mehr Elastizität wurde daher High Impact Polystyrene (HIPS) zugegeben. Die Materialzusammensetzung des R-PS bestand somit aus 80% Kleiderbügeln und 20% HIPS. Die Ausbringungsmenge lag somit bei 2 x 1000 g.

Die Extrusion des Filaments wurde mit einer Temperatur von 240-245°C durchgeführt. Beim Druck des R-PS konnte nur eine unzureichende Bodenhaftung festgestellt werden. Die beste Druckbett-Haftung konnte auf einer Beschichtung des Herstellers tefka mit den Charakteristika BRIM 20L und 85 Grad generiert werden. Nicht möglich war der Druck auf sonst im FFF-Verfahren gängigen Materialien wie Glas, BuidTak und MT-Plus. Die Schichtenhaftung konnte ebenfalls als gut eingestuft werden. Die Druckgeschwindigkeit der Testdrucke war befriedigend. Die Darstellung der Auflösung mit 0,2mm Schichthöhe, was den gängigsten Einstellungen des FFF-Verfahrens entspricht, war gut. Die Prozess-Stabilität während des Drucks war jedoch unzureichend. Tabelle 3 fasst die Ergebnisse der Extrusion und Verarbeitung von R-PP und R-PS im 3D-Druck zusammen.

Tabelle 3: Ergebnisse der Extrusion von R-PP und R-PS und Verarbeitung im 3D-Druck

	Polypropylen	Polystyrol
Bodenhaftung	Gut	Unzureichend
Schichtenhaftung	Gut	Gut
Druckgeschwindigkeit	Befriedigend	Ausreichend
Auflösung	Gut	Gut
Prozess-Stabilität	gut	Unzureichend

Quelle: Eigene Darstellung

Analyse: Druckbare Produkte am PoS:

Parallel zur Herstellung von Filament aus R-PP und R-PS wurde eine Druckbarkeits-Analyse für Produkte am PoS durchgeführt. Hier stand zunächst eine Prüfung der Druckbarkeit von Kleiderbügeln aus gängigen Kunststoffarten im FFF-Verfahren wie Polylactic Acid (PLA) und Polyethylenterephthalat (PETG modifiziert mit Glykol) an. Hierzu wurde zunächst ein druckbares 3D-Modell eines Kleiderbügels mittels einer CAD-Software erstellt. Im nächsten Schritt wurden Werkstofftests mit verschiedenen Filament-Qualitäten für den Druck von Kleiderbügeln durchgeführt und ein 3D-Testdruck eines Kleiderbügels vorgenommen. Nach Validierung der Druckbarkeit verschiedener Werkstoffe wurde anschließend der finale Kleiderbügel aus PETG gedruckt.

Nachdem die grundsätzliche Druckbarkeit von Kleiderbügeln festgestellt werden konnte, wurde das Ergebnis auf einem Arbeitstreffen zusammen mit den Verbund- und Praxispartnern präsentiert und diskutiert. Der 3D-Druck von Kleiderbügeln, z.B. als personalisiertes Giveaway für die Kunden bei einem Kauf, wurde von den Teilnehmenden des Arbeitstreffens als wenig

sinnvoll erachtet. Daher wurde auf Testdrucke mit R-PP und R-PS verzichtet. Stattdessen wurden für den Druck von R-PP und R-PS Alternativprodukte in Betracht gezogen, die für die Praxispartner auch als lohnende Marketingmaßnahme eingesetzt werden könnten.

Im Folgenden wurde daher eine Druckbarkeits-Analyse von Alternativprodukten für die Praxispartner durchgeführt, die anschließend auf einem Praxis-Workshop vorgestellt wurden. Die Drucktests beinhalteten die üblichen Schritte der additiven Fertigung im FFF-Verfahren: Extrusion, Haftung, Probedrucke, sowie Prozessoptimierung. Der Prozessablauf der Drucktests ist in Abbildung 4 dargestellt:

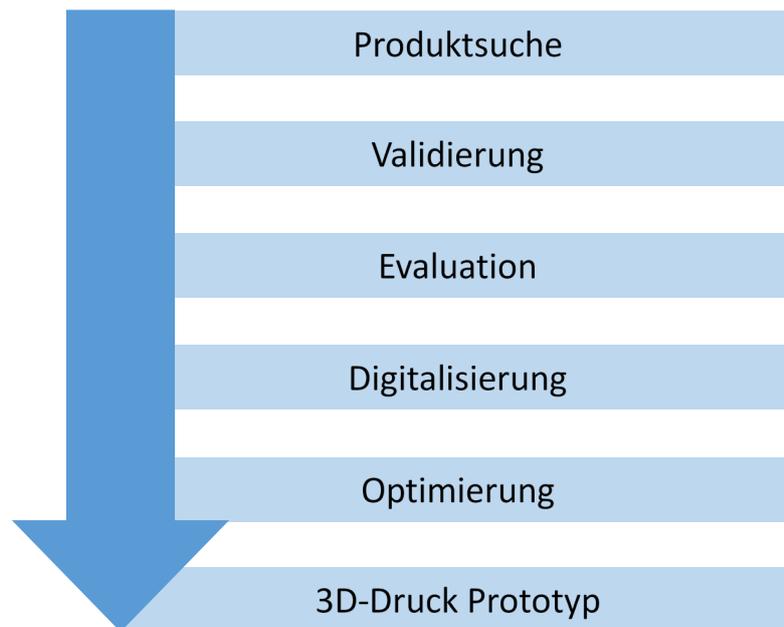


Abbildung 4: Prozessablauf Drucktests zur Produktbestimmung

Quelle: Eigene Darstellung

Weiterhin wurde die Druckbarkeit des zuvor hergestellten recycelten Filaments aus R-PP und R-PS getestet. Als Benchmark-Test wurden beispielhaft kleine Schiffchen (ca. 6cm*2cm), ein „Göffel“ (ca. 10cm*2cm) sowie eine voll funktionsfähige Rucksackschnalle (ca. 6cm*2cm) gedruckt. Diese Tests wurden durchgeführt, um mögliche Einsatzbereiche des recycelten Filaments zu erforschen. Die Ergebnisse zeigen, dass z.B. (Ersatz-)Rucksackschnallen, Spielzeuge oder Werkzeuge gedruckt werden können, die Einzelhändler auf ihrer Ladenfläche zum Verkauf anbieten könnten (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Drucktest-Modelle aus Recycling-Filament

Quelle: Eigene Aufnahme

Validierung der Idee im Praxisworkshop:

In einem nächsten Schritt wurde die Perspektive verschiedener Hersteller und Händler auf einem Praxis-Workshop in Straubing (November 2018) eingeholt. Hier wurde zunächst das Konzept sowie das 3D-Druck-Verfahren erläutert. Verschiedene Einsatzbereiche und Anwendungsfälle wurden im Workshop-Format „World Café“ diskutiert, um die Meinung aller Teilnehmer zu den verschiedenen Themenschwerpunkten einholen zu können.

Im Ergebnis sahen die Teilnehmer des Workshops Anwendungsfelder insbesondere in der Herstellung von individualisierten Produkten als Marketing-Aktion für Unternehmen oder die Stadt, sowie in der Herstellung spezifischer Ersatzteile, wie bspw. Rucksackschnallen, welche die Lebensdauer von Produkten verlängern könnten. Ebenso wurde der Aspekt der Bewusstseins-schaffung für das Verpackungsaufkommen am PoS bei den Konsumenten hervorgehoben.

Fazit zur praktischen Umsetzbarkeit der Recyclinganlage am PoS: Die praktische Umsetzbarkeit der Anlage am PoS ist unter Berücksichtigung der zuvor erläuterten Anforderungen in Bezug auf folgende Aspekte nicht gegeben: (1) Die benötigte Fläche am PoS kann von Einzelhändlern aufgrund der geringen Raumkapazitäten nicht zu Verfügung gestellt werden. (2) Die monatliche Abfall-Mindestmenge kann von einem Einzelhändler allein nicht erreicht werden. (3) Die Sortierung der Kunststoffabfälle kann nicht automatisch erfolgen, sodass die Anforderungen an das Personal zu hoch sind und neues Personal mit entsprechenden Kompetenzen eingestellt werden müsste. Im Rahmen des Praxis-Workshops wurde jedoch die Übertragbarkeit des Grundkonzeptes auf einen Zusammenschluss von mehreren regionalen Einzelhändlern besprochen und positiv bewertet. In diesem Zusammenhang wurden vor allem das Potential der Bewusstseins-schaffung bei den Konsumenten und der Aspekt der regionalen/städtischen Vermarktung als vielversprechend angesehen. Da die praktische Umsetzbarkeit insbesondere aufgrund der Restriktionen auf Seiten eines Einzelhändlers nicht gegeben ist, wird eine Umsetzbarkeit durch die Kooperation mehrerer Händler als vielversprechend eingestuft.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde als Alternative zur Recyclinganlage am PoS das sogenannte „FATM-Konzept“ erarbeitet, bei dem eine gemeinsame Umsetzung der Anlage durch einen Verbund aus Einzelhändlern angestrebt wird. Das Konzept wird im folgenden Kapitel im Detail vorgestellt.

3.1.4 Ausarbeitung der Alternative „FATM-Konzept“

3.1.4.1 Erläuterung der Grundidee

Die Grundidee hinter dem „FATM-Konzept“ ist eine Erweiterung des anfangs angedachten PoS-Konzepts hin zu einer regionalen Lösung: Hierfür wird am PoS anfallender Kunststoffabfall (PS und PP) von allen teilnehmenden Händlern regional gesammelt und an einem zentralen Ort zu Granulat und Filament verarbeitet. Durch die damit bedeutend höheren Mengen an Kunststoffabfall lässt sich ein wirtschaftlicher Prozess etablieren. Einzelne Händler hätten nicht die Anschaffungs- und Betriebskosten einer eigenen Recyclinganlage sowie die Schulungskosten für das Personal zu tragen. Auf städtischer bzw. kommunaler Ebene ließe sich das Konzept für Marketing- und Aufklärungszwecke nutzen. Eine zentrale Sammelstelle von z.B. Kleiderbügeln in Innenstadtlage kann zur Bewusstseins-schaffung der Konsumenten beitragen. Weiterhin kann das recycelte Filament inkl. 3D-Drucker von Unternehmen, Schulen, Vereinen und sonstigen Institutionen für verschiedene Aktionen genutzt werden. Hier könnten individuelle Produkte vor Ort gedruckt werden – je nach Bedarf und Anlass. Mit dem FATM-Konzept könnte das Ziel verfolgt werden, bei Verbrauchern Aufmerksamkeit für das Thema Kreislaufwirtschaft zu schaffen. Eine Kommune als Träger einer solchen Anlage würde gleichzeitig über ein interaktives Aufklärungsinstrument zum Thema Kunststoffabfall am PoS und den vorgelagerten Stufen der Lieferkette verfügen.

Da Konsumenten den Prozess der Produkterstellung live miterleben sollen, sollte die Druckdauer der hergestellten Produkte maximal 10 Minuten betragen. Das erzeugte Produkt muss darüber hinaus einen direkten Nutzen stiften und dabei von eher geringer Größe sein, um die gegebene Zeitrestriktion einzuhalten. Der 3D-Druck bietet außerdem den Vorteil, dass anhand von CAD-Dateien sehr spezifische Produkte gedruckt werden können. Dies ist insbesondere zur Herstellung von Ersatzteilen wie beispielsweise Rucksackschnallen oder anderer Verschlüsse von hoher Relevanz. Häufig sind Ersatzteile für ältere Produkte nicht mehr oder nur schwer erhältlich. Gerade in diesen Fällen ist das 3D-Druck Verfahren für Verbraucher von hohem Nutzen, da die Produktlebensdauer erheblich verlängert werden kann. Der Einsatz der Recyclinganlage ist gleichzeitig auch zu Marketingzwecken denkbar. So könnten beispielsweise Schlüsselanhänger mit dem Wappen der Stadt gedruckt werden. In jedem Fall sollte eine ausreichend hohe Anzahl von Produktalternativen als CAD-Dateien vorliegen, um unterschiedliche Anforderungen der jeweiligen Zielgruppe erfüllen zu können. Insgesamt bietet die Anlage vielfältige Einsatzmöglichkeiten und die Produktpalette kann durch das Hinzufügen neuer CAD-Dateien laufend angepasst und erweitert werden.

3.1.4.2 Betriebswirtschaftliche Betrachtung

Die betriebswirtschaftliche Betrachtung in Tabelle 4 bildet die für das „FATM-Konzept“ anfallenden Kosten über sechs Jahre ab. Diese lassen sich untergliedern in Anfangsinvestitionen, Fixkosten und variable Kosten. Die Quantifizierung der Kosten setzt sich aus fundierten Annahmen und Expertenschätzungen zusammen, eine jährliche Preissteigerungsrate von 1,8% wurde berücksichtigt.

Den umfangreichsten Kostenpunkt stellen die Personalkosten dar. Hierunter fallen sowohl die Kosten für die Mitarbeiter, welche für die Granulat- und Filament-Verarbeitung benötigt werden, als auch die Mitarbeiter am PoS, welche den 3D-Drucker bedienen. Mit der Recyclingmaschine zur Granulat- und Filament-Verarbeitung und dem 3D-Drucker gehen weitere Kostenpunkte einher. Die Anschaffungskosten werden gemäß der Abschreibungstabelle für allgemein verwendbare Anlagegüter über sechs Jahre lang abgeschrieben. Zudem sind die vorgeschriebenen jährlichen Instandhaltungen und Wartungen der Maschinen kostenintensiv. Die für die Maschinen benötigte Fläche kann in die Fläche für den 3D-Drucker und die für die Recyclingmaschine aufgeteilt werden. Der 3D-Drucker benötigt ungefähr 4m² Fläche und kann entweder in eine Ladenfläche integriert werden oder an einem neutralen, exponierten Ort wie beispielsweise der Rathaushalle aufgestellt werden. Die Verarbeitung zu Granulat und Filament findet idealerweise in einer Lagerhalle in einem Gewerbegebiet statt. Da im Vergleich zur PoS-Variante zusätzlich zur benötigten Fläche für die Recyclinganlage auch Lagerfläche für die gesammelten Kunststoffabfälle und das produzierte Filament benötigt wird, sollte die Fläche der Lagerhalle mindestens 200m² betragen.

Eine Deckung der dargestellten Kosten kann durch eine Kombination von Produktverkäufen, Führungen durch die Anlagen und ein zweijähriges Förderprogramm grundsätzlich erreicht werden. Durch den Druck und Verkauf von diversen Ersatzteilen und Souvenirs kann für einen durchschnittlichen Produktpreis von 3,50€ insgesamt die Deckung der variablen Kosten erreicht werden. Führungen durch die Recyclinganlage und am PoS dienen neben der weiteren Einnahmengenerierung auch Aufklärungszwecken und können so zu einem erweiterten Bewusstsein der Konsumenten beitragen. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht kann die Umsetzung des FATM-Konzepts auf Basis der zuvor erläuterten Annahmen somit insgesamt als lohnenswert eingestuft werden.⁶

⁶ Die vollständige Kostenkalkulation und detaillierte Informationen über die zugrundeliegenden Annahmen können auf Anfrage von den Autoren zur Verfügung gestellt werden.

Tabelle 4: Kostenkalkulation für die Recyclinganlage im Rahmen des FATM-Konzeptes

	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5	Jahr 6
Anfangsinvestitionen						
Mitarbeiterschulung	1.200 €					
Jährliche Fixkosten	59.003 €	59.612 €	60.231 €	60.862 €	61.503 €	62.156 €
Abschreibungen	19.250 €	19.250 €	19.250 €	19.250 €	19.250 €	19.250 €
Kalkulatorische Zinsen	5.250 €	5.250 €	5.250 €	5.250 €	5.250 €	5.250 €
Instandhaltung/Wartung	18.000 €	18.318 €	18.641 €	18.970 €	19.305 €	19.645 €
Fläche	15.418 €	15.690 €	15.967 €	16.249 €	16.536 €	16.828 €
CAD-Software	720 €	733 €	746 €	759 €	772 €	786 €
WLAN	364 €	371 €	377 €	384 €	391 €	398 €
Jährliche variable Kosten	31.587 €	32.145 €	32.712 €	33.289 €	33.877 €	34.475 €
Personal	25.696 €	26.149 €	26.611 €	27.080 €	27.558 €	28.045 €
Strom	190 €	194 €	197 €	201 €	204 €	208 €
Reparatur	3.600 €	3.664 €	3.728 €	3.794 €	3.861 €	3.929 €
Transport Kunststoffabfälle	2.101 €	2.138 €	2.176 €	2.215 €	2.254 €	2.293 €
Gesamtkosten	91.790 €	91.756 €	92.943 €	94.151 €	95.380 €	96.631 €
				Durchschnittliche jährliche Gesamtkosten		93.775 €
				Durchschnittliche jährliche Fixkosten		60.561 €
				Durchschnittliche jährliche variable Kosten		33.014 €

Quelle: Eigene Darstellung

Wie aus Tabelle 4 ersichtlich wird, stellen die Abschreibungen der Recyclinganlage sowie Instandhaltung und Wartung wesentliche Kostentreiber dar. Die vorgestellte Kalkulation bezieht sich auf die Anschaffung einer Schredder-, Schmelz- und Granuliermaschine sowie eines Extruders für die industrielle Nutzung. Diese Maschinen haben eine sehr hohe Maximalkapazität, sodass bei den hier berücksichtigten Mengen an Kunststoffabfall die wöchentliche Auslastung der Maschinen nur etwa 2 Stunden beträgt. Aufgrund der technologischen Entwicklungen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass zukünftig kleinere Maschinen mit geringerer Kapazität auf dem Markt erhältlich sind. Daher bieten sich zwei unterschiedliche Ansätze, um bei der tatsächlichen Umsetzung des FATM-Konzepts derartige Überkapazitäten zu vermeiden. Einerseits könnten die Überkapazitäten der Recyclinganlage abgebaut werden, indem neuartige Maschinen mit geringerer Kapazität zu niedrigeren Anschaffungskosten erworben werden. In diesem Zuge kann auch von sinkenden Kosten für Instandhaltung und Wartung ausgegangen werden. Insgesamt ließen sich durch die Nutzung kleinerer Maschinen die Fixkosten der Recyclinganlage erheblich senken. Dafür ist jedoch die Markteinführung entsprechender Maschinen abzuwarten. Andererseits könnte eine stärkere Auslastung der industriellen Maschinen durch Verarbeitung größerer Mengen von Kunststoffabfällen angestrebt werden. Dafür müssten weitere Händler als Partner gewonnen werden, die ihren Kunststoffabfall sortenrein zur Verfügung stellen. Somit könnte eine größere Menge Recycling-Filament hergestellt werden. Um die steigenden Mengen von Recycling-Filament zu Produkten aus dem 3D-Drucker zu verarbeiten, könnte dieser auch außerhalb der Öffnungszeiten des PoS betrieben werden. Dadurch könnte eine Erhöhung der Produktionszeit des 3D-Druckers von 25 auf etwa 150 Stunden pro Woche erreicht werden. Außerhalb der Öffnungszeiten ist eine Betreuung des 3D-Druckers durch einen Mitarbeiter vor Ort bei entsprechender Programmierung nicht erforderlich, sodass die Ausweitung der Druckerlaufzeit nicht zwangsläufig auch mit steigenden Personalkosten einhergehen würde. Allerdings wären zusätzliche Stromkosten zu berücksichtigen. Unter der Annahme, dass die zusätzlich hergestellten Produkte aus dem 3D-Drucker ebenfalls verkauft werden können, würden mit der gesteigerten Auslastung der Maschinen auch steigende Umsätze aus Produktverkäufen einhergehen.

3.1.4.3 Ökobilanzielle Bewertung

Nachdem die betriebswirtschaftliche Beurteilung des FATM-Konzepts zeigt, dass eine Umsetzung der Recycling-Anlage auf kommunaler Ebene kostendeckend bzw. gewinnbringend möglich ist, wird anschließend eine ökobilanzielle Bewertung des Konzepts durchgeführt. Anhand eines Ökobilanzscreenings wird überprüft, ob die konzipierte Recycling-Anlage auch in Bezug auf ihre Umweltwirkungen als vorteilhaft einzustufen ist.

Die Bewertung erfolgt durch ein Ökobilanzscreening nach der vom Umweltbundesamt (Finkbeiner et al. 2019) und der EU Kommission (European Commission 2012; Zampori & Pant 2019) empfohlenen Herangehensweise des Environmental Footprint EF 3.0. Der Environmental Footprint (EF) ist eine auf der Ökobilanz basierende Methode zur Quantifizierung der relevanten Umweltauswirkungen von Produkten (Waren oder Dienstleistungen). Die Priorisierung relevanter Wirkungskategorien erfolgt über die Anwendung von Normalisierung und Gewichtung. Diese Faktoren werden im PEFCR-Guide zur Verfügung gestellt (European Commission 2018b). Dabei werden verschiedene Umweltwirkungskategorien gewichtet, zusammengeführt und nach einem globalen Budgetansatz normalisiert. Dadurch entsteht eine verbrau-

cherfreundliche Kennzahl (European Commission 2018b). Die offiziellen EF 3.0 Normalisierungs- und Gewichtungssätze sind als Standarddatenbank in der GaBi Software verfügbar (sphera 2021), mit der das vorliegende Ökobilanzscreening durchgeführt wird. Die Ergebnisse zeigen den Gesamt-Umweltfußabdruck sowie den darin enthaltenen Beitrag zum Klimawandel (auch bekannt als Treibhausgasemissionen oder CO₂-Fußabdruck) in kg-CO₂-Äquivalent. Die Ergebnisse stellen unterschiedliche Herstellungs-, Verwendungs- und Materialoptionen für die zwei Beispielprodukte „Göffel“ und „Rucksackschnalle“ in Form von Szenarien dar.⁷

Vergleich verschiedener Material- und Herstellungsoptionen

Kunststoffe lassen sich werkstofflich, rohstofflich und energetisch verwerten. Die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen gilt laut dem Umweltbundesamt als besonders hochwertig, wenn aus den Kunststoffabfällen ein zu Regranulat aufbereitetes, sortenreines Sekundärmaterial erzeugt wird, das Primärkunststoffe ersetzt (Umweltbundesamt 2019b). Das im Projektrahmen untersuchte 3D-Druck Verfahren verwendet Sekundärkunststoff als Material. In diesem Falle wird aus Kleiderbügelabfällen, bestehend aus PP oder PS, ein Filament hergestellt. Dieses verwendet somit die Sekundärkunststoffe R-PP und R-PS. Die gewünschten Produkte werden anschließend im 3D-Druck Verfahren aus dem Filament hergestellt. Für beide Beispielprodukte ist der konventionelle Herstellungsprozess die Herstellung aus Primärkunststoff im Spritzgussverfahren.

Um die Umweltwirkungen in Einklang mit den entsprechenden Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 zu ermitteln, müssen Daten für den gesamten Lebensweg der betrachteten Beispielprodukte in die Bilanzierung einbezogen werden (DIN EN ISO 14040, 2009; DIN EN ISO 14044, 2018). Hierzu zählen Informationen zu den verwendeten Rohstoffen, Transporten, Herstellungs- und Verarbeitungsprozessen, Hilfs- und Betriebsstoffen, der Nutzungsphase sowie den Entsorgungswegen des Produktes bzw. Materials, aber auch aller bei der Herstellung anfallenden Abfälle. Da sich die Lebenswege und Nutzungsszenarien der Beispielprodukte wesentlich unterscheiden, werden diese im Folgenden getrennt betrachtet. Trotz ihrer Unterschiede teilen sich die untersuchten Produkte den Herstellungsprozess des Filaments aus den Kleiderbügeln unter der Annahme der alternativen Produktion im 3D-Druck. Die hierzu benötigten Maschinen und entsprechende Prozessdaten sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Maschinen zur Herstellung von Recycling-Filament

Maschine	Durchsatz	Energiebedarf (kWh)
Mühle zum Schreddern	60-200 kg/h (Annahme: hier 130 kg/h)	7,5 kWh
Doppelschnecken-Extruder zur Granulatherstellung Ø 22 mm	350 kg/h	15 kWh
Stranggranulierer	500 kg/h	4 kWh
Einschnecken-Extruder zur Herstellung von Filament Ø 30 mm	6 kg/h	7,5 kWh
3D-Drucker	Annahme: 150 g/h	0,35 kWh

Quelle: Schätzungen beruhen auf eigenen Recherchen sowie Peng & Sun 2017

⁷ Für eine inhaltliche Erläuterung der in diesem Abschnitt verwendeten Fachbegriffe siehe Anhang B.

Die im Folgenden betrachteten Szenarien basieren auf der Annahme, dass die am PoS anfallenden Kleiderbügelabfälle nicht weiterverwendet werden und dem üblichen Entsorgungskreislauf zugeführt werden. Da die Kleiderbügel in der Regel schwarz sind, wird davon ausgegangen, dass die Kunststoffe in den Sortieranlagen nicht entsprechend erkannt werden und somit der thermischen Verwertung zugeführt werden. Bei der Herstellung von Produkten aus R-PP bzw. R-PS werden die Kleiderbügelabfälle zu Recycling-Filament weiterverarbeitet, sodass eine thermische Entsorgung nicht notwendig ist. Somit wird das Sekundärmaterial aus Abfallmaterial gewonnen, welches ansonsten der Müllverbrennung zugeführt werden würde. Daher wird für die Bilanzierung ein „Avoided Burden“-Ansatz mit lastenfreiem Materialeinsatz gewählt.

Beispielprodukt Göffel:

Der „Göffel“ ist ein Gebrauchsgegenstand, der häufig beim Camping zum Einsatz kommt. Es handelt sich um eine Hybridlösung aus Gabel und Löffel, die je nach Bedarf flexibel eingesetzt werden kann. Die Geometrie des Göffels ermöglicht eine Herstellung im 3D-Druck-Verfahren. In den untersuchten Szenarien zur Bewertung der Herstellungsverfahren eines Göffels werden die Verfahren des konventionellen Spritzgussverfahrens mit PP bzw. PS und die Herstellung eines Göffels aus R-PP und R-PS im 3D-Druck-Verfahren hinsichtlich ökologischer Belange bewertet und verglichen.⁸

Die Herstellung von R-PS Filament erfordert den zusätzlichen Einsatz des Werkstoffes HIPS. Dieser hochwertige Primärkunststoff wird zu einem Anteil von 20% zugegeben, um dem Göffel die erforderliche Stabilität zu geben. Für die Herstellung von R-PP Filament wird kein zusätzliches Material benötigt. Dies ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Material des Filaments und Prozentsatz im Endprodukt

Produkt	Kunststoff	Material des Filaments	% im Endprodukt
Göffel aus R-PP	R-PP	PP aus Kleiderbügeln	100%
Göffel aus R-PS	R-PS	PP aus Kleiderbügeln	80%
		HIPS	20%

Quelle: Eigene Erstellung

Die unterschiedlichen Szenarien inklusive Systemgrenzen sind in Abbildung 6 und der folgenden Tabelle 7 gegenübergestellt.

⁸ Bei den betrachteten Szenarien handelt es sich lediglich um Beispiele zur Veranschaulichung der potenziellen Umweltwirkung der Recycling-Anlage. Die Zulassung des R-PP und R-PS für den Lebensmittelkontakt, bspw. in Form eines Göffels, wurde nicht überprüft.

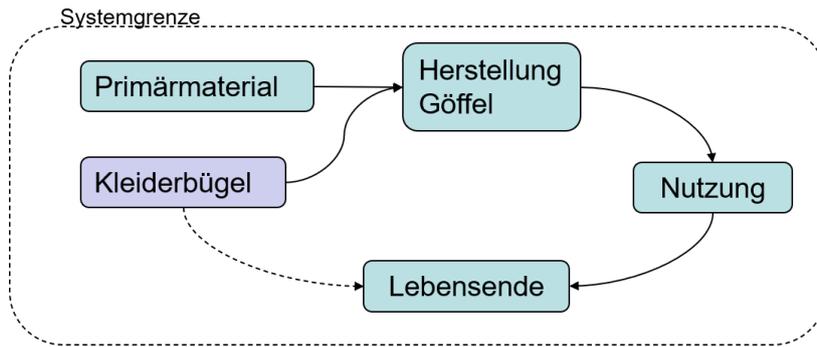


Abbildung 6: Schematischer Lebenszyklus des Beispielprodukts Göffel

Quelle: Eigene Erstellung

Tabelle 7: Szenarien für das Beispielprodukt Göffel

Szenario	Material	Herstellungsverfahren	Transport zum PoS	Lebensende
1	PP	Spritzguss	200km per LKW	Verbrennung des Göffels und der Kleiderbügel vom PoS
2	PS	Spritzguss	200km per LKW	Verbrennung des Göffels und der Kleiderbügel vom PoS
3	R-PP	3D-Druck	Herstellung am PoS	Verbrennung des Göffels
4	R-PS	3D-Druck	Herstellung am PoS	Verbrennung des Göffels

Quelle: Eigene Darstellung

Wie in Tabelle 7 dargestellt, wird für den Göffel aus Primärmaterial ein Transportweg von ca. 200km per LKW berücksichtigt, da die Herstellung nicht direkt am PoS erfolgt. Bei allen betrachteten Szenarien wird von einer thermischen Verwertung (Müllverbrennung mit Energierückgewinnung) des Göffels am Lebensende ausgegangen. Außerdem wird in den Szenarien 1 und 2 die Verbrennung der nicht recycelten Kleiderbügel berücksichtigt.

Um die Funktion des Produktsystems über alle Szenarien hinweg einheitlich zu quantifizieren, ist es erforderlich, eine funktionelle Einheit festzulegen (DIN EN ISO 14040, 2009). Anhand dieser werden alle übrigen Prozesse und Flüsse bestimmt. Für dieses Produktbeispiel wird dazu ein Kunststoff-Göffel mit den Maßen 100x20x4 mm festgelegt.

Die funktionelle Einheit für das Beispielprodukt definiert sich nicht über die Masse eines Göffels, sondern über die Abmaße bzw. das Volumen. Diese Unterscheidung ist wichtig, da die verwendeten Werkstoffe PP und PS unterschiedliche Dichten aufweisen und sich entsprechend andere Produktmassen ergeben. Die Gewichte der Produkte aus Sekundärrohstoffen sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Masse der Produkte aus dem 3D-Drucker

Produkt	Masse
Göffel aus R-PP	7,2 g
Göffel aus R-PS	8 g

Quelle: Eigene Darstellung

Die Ergebnisse des Ökobilanzscreenings werden im Folgenden vorgestellt. Sie zeigen die vier verschiedenen Szenarien und deren Lebenszyklusphasen (Rohstoff- bzw. Materialgewinnung, Herstellung, Transport und Lebensende). Das Ergebnis der ersten Bilanzierung zeigt den allgemeinen Umweltfußabdruck in Abbildung 7, der Beitrag zum Klimawandel (CO₂-Fußabdruck) ist in Abbildung 8 dargestellt.

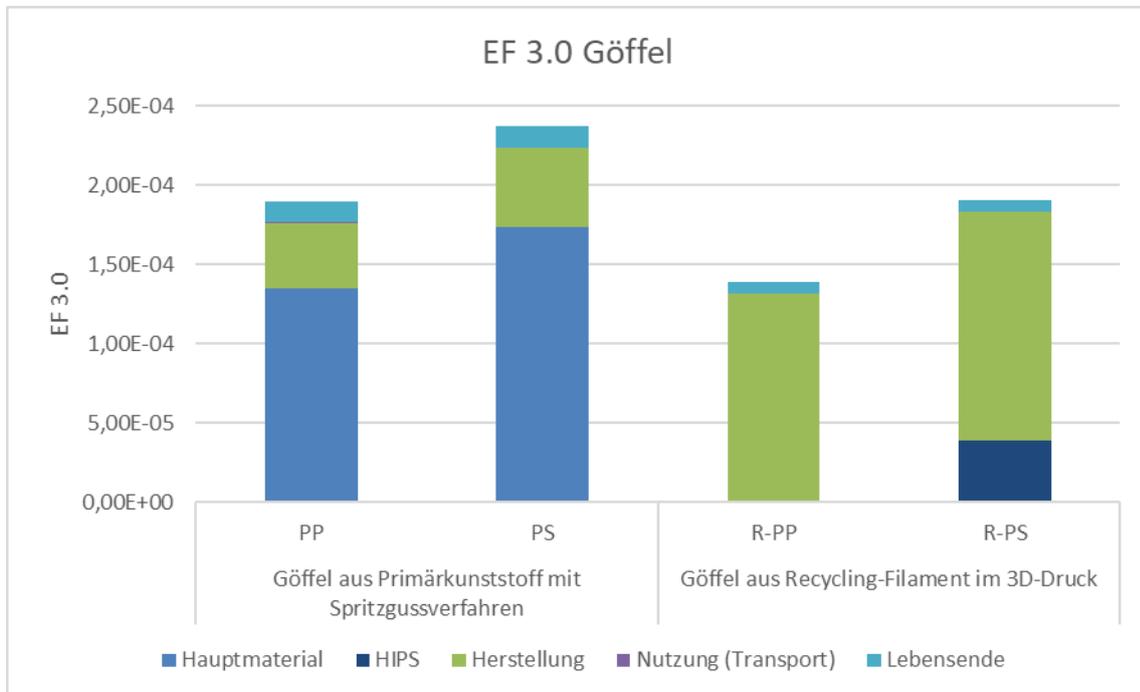


Abbildung 7: Ergebnisse des EF für das Beispielprodukt Göffel

Quelle: Eigene Darstellung

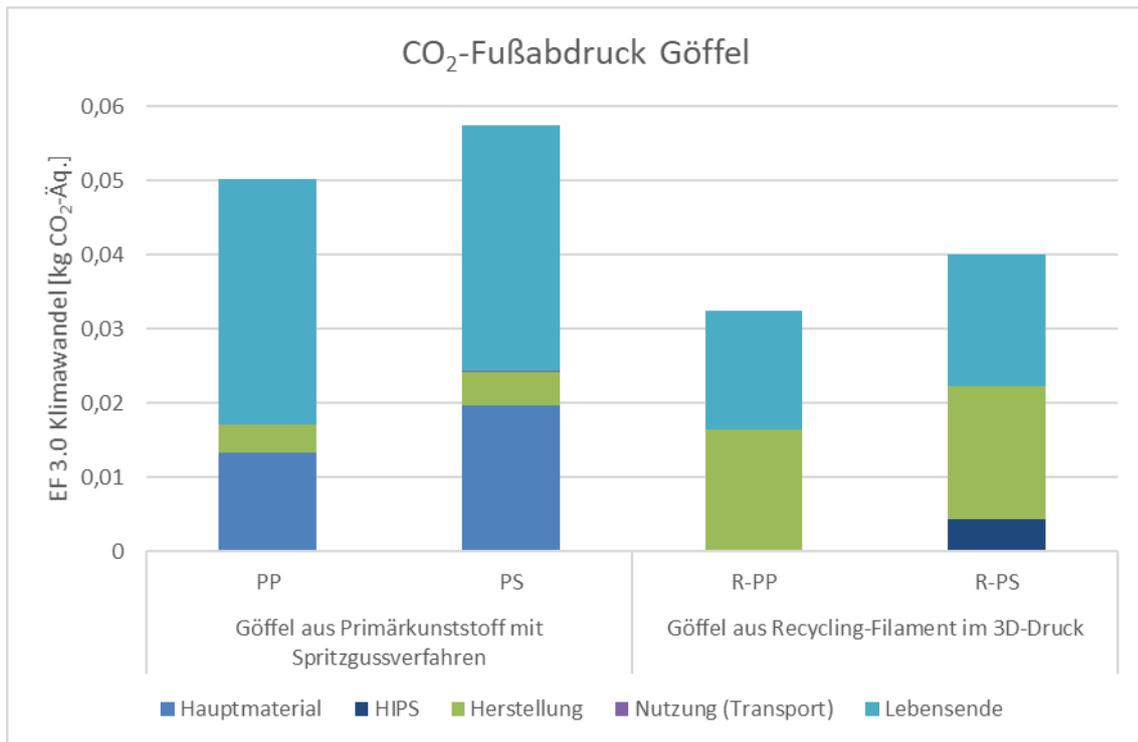


Abbildung 8: Ergebnisse des CO₂-Fußabdrucks für das Beispielprodukt Göffel

Quelle: Eigene Darstellung

Die Ergebnisse des Ökobilanzscreenings zeigen, dass für beide Kunststoffarten (PP und PS) die Herstellung des Göffels aus Recycling-Filament im 3D-Druck mit weniger Umweltwirkungen (EF) verbunden ist als die Herstellung des Göffels aus Primärkunststoff im Spritzgussverfahren. Das Material PP schneidet für die Verwendung als Primär- und Sekundärwerkstoff (R-PP) besser ab als das aus PS bzw. R-PS. In der vorliegenden Fallstudie wird das Sekundärmaterial (R-PP und R-PS) aus Abfallmaterial gewonnen, welches ansonsten der Müllverbrennung zugeführt werden würde. Daher wurde ein „Avoided Burden“ Ansatz mit lastenfreiem Materialeinsatz gewählt. Zwar ist die Umweltwirkung des Herstellungsprozesses beim 3D-Druck größer als beim Spritzgussverfahren, die Umweltwirkung des Recyclingmaterials jedoch im Vergleich zu Primärkunststoff deutlich geringer. Jedoch ist auch in dieser Wirkungskategorie der erhöhte Energiebedarf durch den 3D-Druck zu sehen.

Diese Tendenz in den Ergebnissen ist auch im CO₂-Fußabdruck zu sehen. Für die beiden betrachteten Materialien R-PP und R-PS sinken die Auswirkungen auf den Klimawandel durch die Verwendung des Sekundärrohstoffs. In Abbildung 8 erkennt man, dass der intensivere Energieverbrauch des 3D-Druck-Verfahrens mit einem höheren CO₂-Austoß verbunden ist. Jedoch entsteht der größte CO₂-Fußabdruck durch das Lebensende bzw. die Kunststoffverbrennung. In Szenario 1 und 2 werden neben dem Göffel (nach dem Ende seiner Lebensdauer) auch die Kleiderbügel der thermischen Verwertung zugeführt, in Szenario 3 und 4 lediglich der Göffel.

Zusammenfassend kann die Aussage getroffen werden, dass im Falle des Beispielprodukts Göffel das 3D-Druck-Verfahren dem klassischen Spritzgussverfahren aus ökologischer Sicht vorzuziehen ist.

Beispielprodukt Rucksackschnalle:

Bei der Betrachtung des Beispielprodukts Rucksackschnalle wird von einer Nutzung der Schnalle als Ersatzteil ausgegangen. Für den Umgang mit einer kaputten Rucksackschnalle ergeben sich drei Szenarien. Entweder kann (1) der Rucksack trotz kaputter Schnalle weitergenutzt werden, (2) eine neue Schnalle aus R-PP im 3D-Druck hergestellt und der Rucksack somit repariert werden, oder (3) ein neuer Rucksack gekauft werden.

Die drei betrachteten Szenarien inklusive ihrer zugehörigen Systemgrenzen sind in Abbildung 9 und Tabelle 9 dargestellt. Auch diese Szenarien basieren auf der Annahme, dass die am PoS anfallenden Kleiderbügelabfälle nur im Falle der Nutzung als Recycling-Filament zur Herstellung der Ersatzschnalle hochwertig recycelt werden und in den anderen Fällen der thermischen Verwertung zugeführt werden. Für die Herstellung des Rucksacks wird angenommen, dass dieser in China produziert und per Seefracht 9000km nach Europa und anschließend 750km per LKW zum PoS transportiert wird.

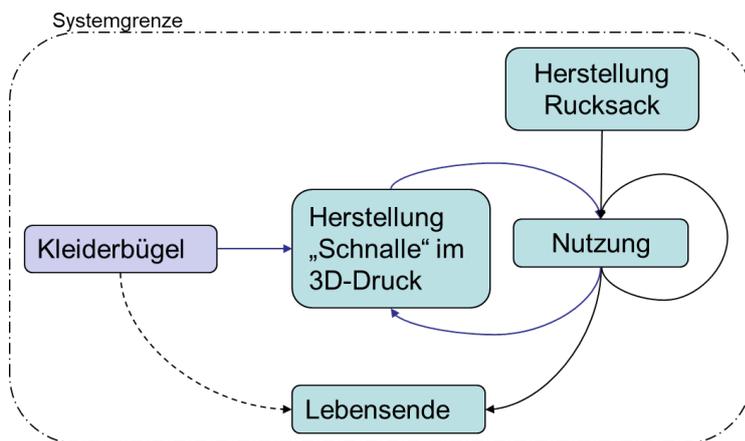


Abbildung 9: Schematischer Lebenszyklus des Beispielprodukts Rucksackschnalle

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 9: Szenarienvergleich für das Beispielprodukt Rucksackschnalle

Szenario	Herstellungsphase	Lebensende
(1) Wiederverwenden	-	Verbrennung der Kleiderbügel vom PoS
(2) Reparieren	Herstellung einer Ersatz-Rucksack-schnalle aus R-PP im 3D-Druck	-
(3) Neukauf	Herstellung eines neuen Rucksacks	Verbrennung des alten Rucksacks und der Kleiderbügel vom PoS

Quelle: Eigene Darstellung

Die funktionelle Einheit für das Produkt Rucksackschnalle wurde in den verschiedenen Szenarien wie in Tabelle 10 dargestellt definiert. Es wird angenommen, dass die Masse der Rucksackschnalle aus dem 3D-Drucker 13g beträgt.

Tabelle 10: Funktionelle Einheit für das Beispielprodukt Rucksackschnalle

Szenario	Rucksack Szenarien	Funktionelle Einheit
1	Nutzung des vorhandenen Rucksacks ohne Rucksack-schnalle (leicht veränderte Funktion)	Nutzung eines zweckgerechten/funktionsfähigen Rucksacks
2	Herstellung einer Rucksackschnalle aus R-PP im 3D-Druck	
3	Kauf eines neuen Rucksacks	

Quelle: Eigene Darstellung

In den folgenden Abbildungen 10 und 11 werden die Ergebnisse des Ökobilanz-Screenings für die betrachteten Szenarien anhand des EF 3.0 und des CO₂-Fußabdrucks dargestellt.

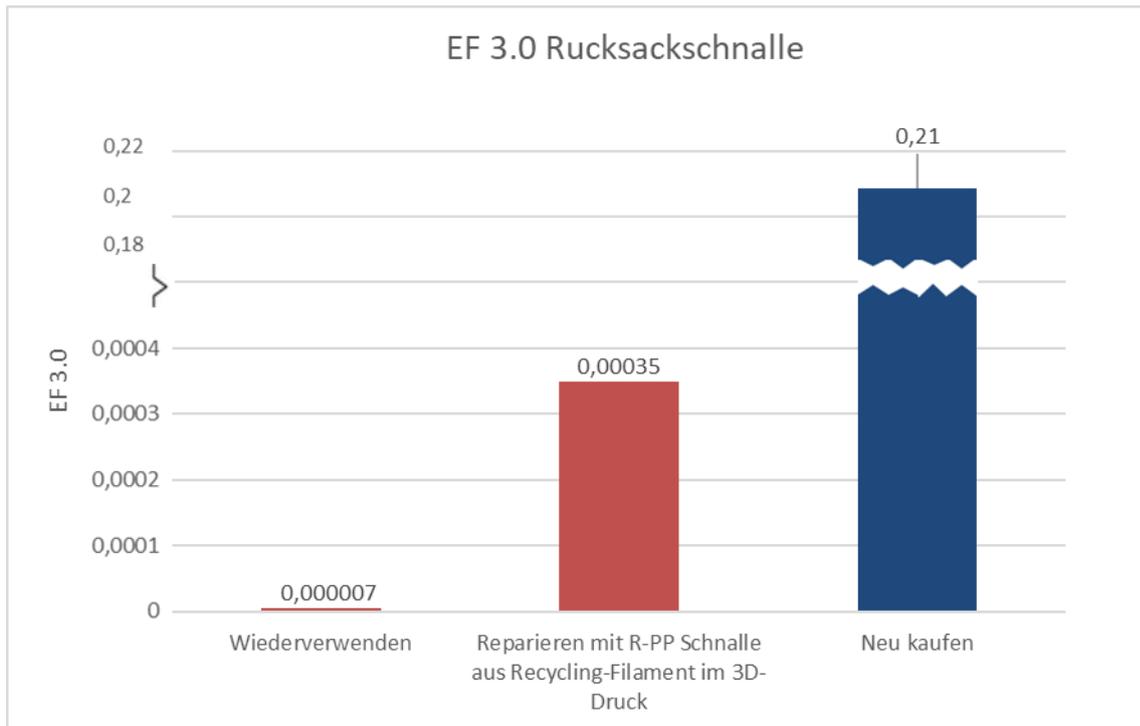


Abbildung 10: Ergebnisse des EF für das Beispielprodukt Rucksackschnalle

Quelle: Eigene Darstellung

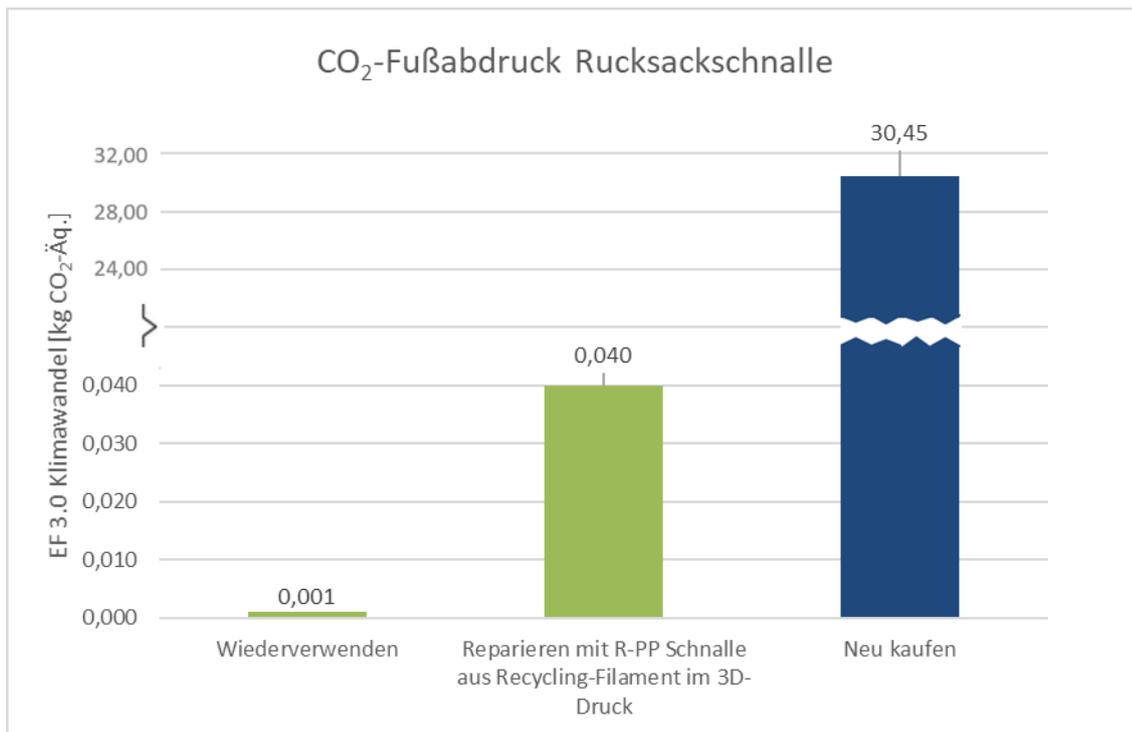


Abbildung 11: Ergebnisse des CO₂-Fußabdrucks für das Beispielprodukt Rucksackschnalle

Quelle: Eigene Darstellung

Die Ergebnisse des Ökobilanzscreenings zeigen, dass die Herstellung einer Rucksackschnalle aus R-PP im 3D-Druck und die damit einhergehende Verlängerung der Nutzungsdauer des Produkts mit deutlich weniger Umweltwirkungen verbunden ist als der Kauf eines neuen Rucksacks.

Der Kauf eines neuen Rucksacks ist mit etwa 600-fach höheren Umweltwirkungen (EF) verbunden. Eine Abschätzung der für den Klimawandel relevanten Emissionen (CO₂-Äq.) ergibt einen etwa 760-fach höheren Ausstoß in Szenario 3. Im zweiten Szenario ergeben sich die Umweltbelastungen hauptsächlich aus dem Energieverbrauch des 3D-Druckprozesses, zu dem auch das Recycling (Schreddern, Granulat- und Filamentherstellung) der Kleiderbügel gehört. Im ersten Szenario ergibt sich die Umweltbelastung der Wiederverwendung des Rucksacks mit kaputter Schnalle aus der Verbrennung der Kleiderbügel, die nicht recycelt werden. Daran gemessen ist die Umweltauswirkung der Herstellung einer neuen Schnalle im 3D-Druck marginal höher als eine Weiterverwendung des Rucksacks mit defekter Schnalle.

Auch wenn die Reparatur mit einer Schnalle aus dem 3D-Druck im Vergleich zur unmittelbaren Weiterverwendung erhöhte Auswirkungen auf die betrachteten Wirkungskategorien mit sich bringt, so kann auf diesem Wege die volle Funktionsfähigkeit des Produktes wiederhergestellt werden und unter Umständen der aus ökologischer Sicht wiederum deutlich intensivere Kauf eines neuen Rucksacks vermieden werden.

Fazit zur ökobilanziellen Bewertung

Das Ökobilanzscreening zeigt für beide betrachteten Beispielprodukte in den Auswertungen eine Tendenz von geringeren Umweltwirkungen durch das 3D-Druck Verfahren im Vergleich zum (1) konventionellen Spritzgussverfahren bzw. (2) dem Kauf eines neuen Produkts. Sowohl die Ergebnisse des allgemeinen Umweltfußabdrucks als auch die Beurteilung des Klimawandels anhand des CO₂-Fußabdrucks zeigen, dass die Herstellung eines Produkts im 3D-Druck-Verfahren mit Filament aus Kleiderbügelabfällen mit weniger Umweltwirkungen verbunden ist als konventionelle Lösungen wie der Herstellungsprozess über ein Spritzgussverfahren aus Primärkunststoff oder der Kauf eines neuen Produkts. Der Energieverbrauch des 3D-Drucks ist als konservative Datenaufnahme zu betrachten, da diese auf einer Produktion von kleinen Mengen im Entwicklungsstatus beruht. Für eine marktreife Umsetzung ist zu erwarten, dass der Energieverbrauch sinkt und sich die Tendenz der umweltfreundlicheren Produktion von Produkten aus Sekundärmaterial im 3D Druck bestätigt bzw. noch verbessert.

3.2 Erforschung der Nutzung von bioabbaubarem Kunststoff im 3D-Druck

Parallel zur Entwicklung des betriebswirtschaftlichen Konzepts für eine Recyclinganlage wurde die Eignung von bioabbaubaren Kunststoffen zum Einsatz im 3D-Druck Verfahren erforscht. Es wurden zwei verschiedene Typen von Polyhydroxyalcanoaten (PHAs) getestet: Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) und PHB.

Materialeigenschaften von PHAs:

Polymere vom Typ PHA sind thermoplastische Harze aus erneuerbaren pflanzlichen Ressourcen, hergestellt durch bakterielle Zuckergärung (Brandl et al. 1990; Santhanam & Sasidharan 2010, NaturePlast 2021). PHAs haben folgende Eigenschaften:

- Hitzebeständig
- Schnell biologisch abbaubar (Brandl et al. 1990; Avérous & Pollet 2012; Dill 2020)
- Höhere Flexibilität und Barriere-Eigenschaften als PLA
- Undurchsichtig (NaturePlast 2021).

PHAs können wie typische Thermoplaste verarbeitet werden, z.B. durch Extrusion (Folie, Platte, Profil...), Kalandrieren, Thermoformen, oder im Spritzguss. Die Anwendungsmöglichkeiten von PHAs sind vielfältig. Eine Nutzung ist beispielsweise als Lebensmittelverpackung, im Gartenbau, oder in der Herstellung technischer Bauteile denkbar (Brandl et al. 1990; Dill 2020).

PHB und PHBV weisen neben den oben genannten Eigenschaften aller PHAs zusätzliche Besonderheiten auf. Sie sind

- Wasserfest und
- Frei von Katalysatoren (Brandl et al. 1990).

Des Weiteren verfügt PHB über eine geringe Kriechneigung (Dill 2020) und verhält sich in der Schmelze wie Flüssigkristall-Polymere (engl. Liquid Crystal Polymer). Daher sind seine Strukturen nach der Schmelze sehr fein. PHB verfügt über dünne Wände und Mikroteile (Biomer 2021). PHB ist hochkristallin (60-70%) (Brandl et al. 1990; Avérous & Pollet 2012; Dill 2020,

Biomer 2021) und daher lösungsmittelbeständig. Die Einsatztemperatur umfasst -30°C bis 120°C (Avérous & Pollet 2012, Biomer 2021).

Im Folgenden wird der Prozess der Erforschung von PHBV und PHB für den Einsatz im 3D-Druck erläutert.

3.2.1 Analyse des bioabbaubaren Kunststoffes PHBV

Als Voraussetzung für den Einsatz im 3D-Druck wurde das PHBV-Granulat in einem ersten Schritt zu Filament extrudiert. Bei einer Extrusions-Temperatur von 180-190°C konnte aus 7kg Granulat erfolgreich eine 5kg Spule Filament extrudiert werden.

In einem zweiten Schritt wurde die Eignung dieses Filaments für den Einsatz im 3D-Druck getestet. Dabei zeigte sich auf allen verfügbaren Oberflächen eine mangelhafte Druckbett-Haftung. Getestet wurde die Druckbett-Haftung auf Glas-, BuidTak-, MT-Plus- und tefka-Oberflächen. Aufgrund der mangelhaften Druckbett-Haftung war kein Aufbau einer Geometrie möglich. Das getestete PHBV ist somit für die Verwendung im 3D-Druck nicht geeignet. Zwar lässt sich das Granulat zu Filament verarbeiten, jedoch ist dieses sehr brüchig und weist auf allen Oberflächen eine mangelhafte Druckbett-Haftung auf. Die durchgeführten Analyseschritte zur Erforschung des PHBV für den Einsatz im 3D-Druck sind in Abbildung 12 dargestellt:



Abbildung 12: Analyseschritte zur Erforschung des Einsatzes von PHBV im 3D-Druck

Quelle: Eigene Aufnahmen

3.2.2 Analyse des bioabbaubaren Kunststoffes PHB

Auch das PHB konnte erfolgreich zu Filament extrudiert werden. Bei einer Extrusions-Temperatur von 180-190°C konnte aus 5kg Granulat insgesamt 2,4kg (2x900g und 1x 600g) Filament hergestellt werden.

Das Filament wurde wiederum im 3D-Druck getestet. Im Gegensatz zu PHBV war beim PHB der Aufbau einer Geometrie möglich. Die beste Druckbett-Haftung wurde auf MT-Plus- und tefka-Oberflächen erreicht. Im Zuge der Drucktests gelang es, unterschiedliche Produkte aus

dem PHB herzustellen, deren Qualität überzeugte. Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten lassen darauf schließen, dass der bioabbaubare Kunststoff PHB für die Nutzung im 3D-Druck Verfahren grundsätzlich geeignet ist.

3.3 Produktionsverfahren für Textilien aus Rezyklaten/PHB im 3D-Druck

3.3.1 Überblick Status Quo Einsatz von 3D-Druck in der Textilindustrie

Der Einsatz von 3D-Druck in der Textilindustrie bietet die Möglichkeit, lokal und dezentral zu produzieren. Wenn Produkte im 3D-Druck-Verfahren hergestellt werden können, wird weniger Arbeitskraft benötigt. Die in der Textilindustrie weit verbreitete Auslagerung der Produktion nach Asien oder Südosteuropa könnte somit verringert werden und in der Folge könnten auch Transportwege eingespart werden. Durch Anpassungen von Designs in CAD-Dateien kann flexibel auf veränderte Konsumentenbedürfnisse eingegangen werden.

Verschiedene Designer, Bekleidungshersteller und Startups erforschen die Einsatzmöglichkeiten von 3D-Druck zur Herstellung von Bekleidung (Danit Peleg 2020; Julia Daviy 2020; Ministry of Supply 2020; Modeclix 2020; Sirch 2016; von Pentz 2017; 3Dnatives 2019). Bislang gibt es in der Industrie jedoch noch keine einheitlichen Produktionsverfahren. Es werden unterschiedlichste Materialien, Drucker und Technologien erprobt. Aufgrund hoher Kosten und dem Mangel an geeigneten Druckmaterialien ist 3D-Druck in der Textilindustrie bislang kommerziell nicht verbreitet. Lediglich im Bereich der Sportschuhindustrie konnten massentaugliche Produktionsverfahren entwickelt werden (Carbon 2020; Essop 2019; Formlabs 2020; Koslow 2016; Lord 2018; Spiewak 2017; Thum 2018; Zierer 2020; 3Druck 2018). Hier sind insbesondere Kooperationen zwischen Unternehmen der Textil- und Bekleidungsindustrie und Unternehmen mit Expertise im 3D-Druck zu beobachten (Spiewak 2017). Gleichzeitig gibt es jedoch auch viele Unsicherheiten in Bezug auf die Akzeptanz der Technologie. Immer wieder stellen Unternehmen ihre Forschungsarbeiten für 3D-Druck-Produktionsverfahren aufgrund von Problemen mit der Technologie oder mangelnder Nachfrage ein (Cooper 2017; Goehrke 2018; Pasricha & Greeninger 2018; Stevenson 2019). In einer Studie von Samantha Vettese Forster (2017) konnte gezeigt werden, dass eine Wiederverwendung von Textilabfällen durch den Einsatz von 3D-Druck ermöglicht werden kann. Dafür wurde aus pulverisierter Zellulose und flexiblen Polylactiden (engl. polylactic acid, PLA) ein druckfähiges 3D-Filament hergestellt. Das Unternehmen Tamicare hat ein Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe aus recycelten Fasern und recycelten Polymeren in einer Schichttechnologie neue Stoffe hergestellt werden können (Tamicare 2020). Darüber hinaus forschte Emma Grain daran, wie Textilien aus recyceltem Polyethylenterephthalat (rPET) im 3D-Druck hergestellt werden können (Grain 2016). Die Zertifizierung „Ethical Filament“ bescheinigt im Stil von „Fair Trade“ als weltweit anerkannte Marke die ethischen Referenzen der Beschaffung und Produktion von Filamenten aus recycelten Materialien (Ethical Filament 2020).

Aktuelle Forschung zum Einsatz von PHB oder PHBV im 3D-Druck zeigt, dass PHB in Kombination mit PLA zu einer höheren Kristallinität, besserer Hitzebeständigkeit und geringerem Energiebedarf führt, da insgesamt bei niedrigeren Temperaturen gedruckt werden kann (Wang et al. 2018; Wang et al. 2019). Zur Verwendung des bioabbaubaren Thermoplasts PHB bzw. PHBV zur Herstellung von Textilien wurden bislang keine Forschungsarbeiten publiziert. Bestehende Forschung zur Herstellung von Kleidung aus dem 3D-Drucker konzentriert sich insbesondere auf thermoplastisches Polyurethan (TPU). TPU ist aufgrund der hohen Flexibilität und seiner

Textur gut zur Herstellung von Bekleidung geeignet. Mit TPU-Filament lassen sich Textilien mit glatter Oberfläche herstellen, die sich flexibel an die menschliche Silhouette anpassen. Allerdings kann 3D-gedruckte Kleidung aus TPU im Vergleich zu konventioneller Kleidung leicht brechen oder sich lösen, was die Trageeigenschaften mindert. Darüber hinaus haftet TPU häufig an der Düse des Druckers und verstopft diese (Han & Kim 2018; Kim et al. 2019; Lee 2015). Neben TPU wurde auch die Eignung von PLA und Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS) zur Herstellung von Bekleidung erforscht. Beide Materialien eignen sich jedoch weniger gut als TPU (Kim et al. 2019).

3.3.2 Anforderungen an die Beschaffenheit 3D-gedruckter Bekleidung

Die Anforderungen an Bekleidung, die mittels 3D-Druck hergestellt wird, sind insgesamt hoch. Die gedruckte Bekleidung muss flexibel, drapierbar, dehnbar und bequem sein (Bingham et al. 2007; Materialise 2013; Pei et al. 2015). Daher darf die Struktur des Materials nicht porös sein und es darf nicht brechen. Diese Eigenschaft darf sich auch im Zeitverlauf nicht ändern, damit die Haltbarkeit der Bekleidung über einen längeren Zeitraum gewährleistet ist (Pei et al. 2015). Weiterhin darf die Kleidung nicht zu schwer sein, damit ein hoher Tragekomfort sichergestellt ist (Salonitis & Al Zarban 2015). Darüber hinaus müssen auch 3D-gedruckte Kleidungsstücke atmungsaktiv und waschbar sein. Der zuvor aufgezeigte Status quo zeigt insgesamt, dass zwar viele Ansätze zur Herstellung von Bekleidung aus dem 3D-Drucker verfolgt werden, jedoch noch immer großer Forschungsbedarf in Bezug auf geeignete Filamente besteht (Pei et al. 2015).

3.3.3 Evaluation von TPU, R-PP, R-PS und PHB

Insgesamt wurden im Rahmen des Projekts vier verschiedene Filamente in Bezug auf ihre Eignung zur Herstellung von Bekleidung mittels 3D-Druck-Verfahren getestet:

1. TPU: vielversprechend aufgrund der spezifischen Materialeigenschaften
2. R-PP: im Rahmen des Projekts hergestellt aus Kunststoffabfällen vom PoS
3. R-PS: im Rahmen des Projekts hergestellt aus Kunststoffabfällen vom PoS
4. PHB: bislang nicht zur Herstellung von Bekleidung aus dem 3D-Drucker erprobt

Das Ziel der Forschungsarbeiten lag darin, mittels 3D-Druck eine möglichst flexible Struktur aus den unterschiedlichen Kunststoffen herzustellen. Diese „Meterware“ sollte möglichst viele der zuvor erläuterten Anforderungen an Bekleidung aus dem 3D-Drucker erfüllen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Drucktests im Detail vorgestellt.

Ergebnisse Drucktests TPU:

In Tabelle 11 sind die getesteten Kombinationen von Druckparametern abgebildet. Die optimalen Einstellungen für TPU im 3D-Druck sind eine Düsentemperatur von 240°C, eine Druckplattentemperatur von 55°C, ein Druckbett aus MT-Plus oder tefka und eine Schichthöhe von 0,25 mm bei einer Druckgeschwindigkeit von 35 mm/s.

Aus TPU können unterschiedliche Muster und Strukturen im 3D-Druck hergestellt werden. Die gedruckte Netzstruktur zeigt insgesamt einen sehr hohen Flexibilitätsgrad. Das gedruckte Material lässt sich sehr gut biegen und formen, ist nicht porös und bricht nicht. Es lässt sich flexibel drapieren, verformt sich jedoch ohne weitere Befestigung wieder zurück in den Ausgangszustand. Das Material ist nach dem Druck nicht dehnbar. Die Netzstruktur ist luftdurchlässig.

Das Gewicht der Materialprobe beträgt bei einer Größe von 9,5*9,5cm etwa 1,5g. Das Material zeigte sich im Test waschtauglich.

Tabelle 11: Getestete Kombinationen von Druckparametern für TPU

Düse	Druckplatte	Schichthöhe	Druckgeschwindigkeit
230 °C	45 °C	0,1 mm	50 mm/s
240 °C	50 °C	0,2 mm	45 mm/s
245 °C	55 °C	0,25 mm	40 mm/s
240 °C	60 °C	0,25 mm	40 mm/s
240 °C	55 °C	0,25 mm	35 mm/s
240 °C	55 °C	0,3 mm	40 mm/s
240 °C	55 °C	0,25 mm	40 mm/s
240 °C	55 °C	0,25 mm	40 mm/s
240 °C	55 °C	0,25 mm	40 mm/s

Anmerkung: Die optimale Kombination der Druckparameter ist grün hinterlegt.

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildungen 13 und 14 zeigen die Ergebnisse der Drucktests mit TPU.

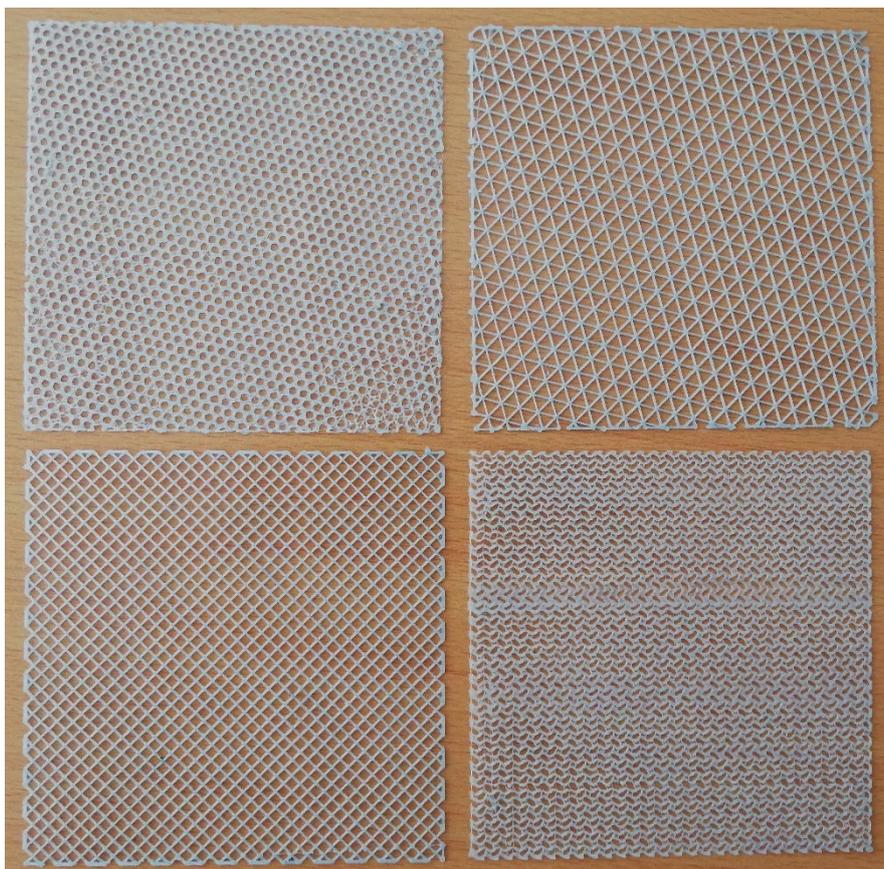


Abbildung 13: Unterschiedliche Muster und Strukturen aus TPU

Quelle: Eigene Aufnahmen



Abbildung 14: Flexibilität von TPU

Quelle: Eigene Aufnahmen

Ergebnisse Drucktests R-PP:

In Tabelle 12 sind die getesteten Kombinationen von Druckparametern abgebildet. Die optimalen Einstellungen für R-PP im 3D-Druck sind eine Düsentemperatur von 250-255°C, eine Druckplattentemperatur von 90°C, ein Druckbett aus tefka und eine Schichthöhe von 0,15 mm bei einer Druckgeschwindigkeit von 30 mm/s.

Aus R-PP können unterschiedliche Muster und Strukturen im 3D-Druck hergestellt werden. Die gedruckte Netzstruktur ist jedoch insgesamt sehr porös und bricht leicht. Das gedruckte Material lässt sich nicht biegen, formen oder drapieren und ist nicht dehnbar. Die Netzstruktur ist luftdurchlässig. Das Gewicht der Materialprobe beträgt bei einer Größe von 9,5*9,5cm etwa 2g. Das Material ist nicht waschtauglich, da die Struktur zu porös ist und leicht bricht.

Tabelle 12: Getestete Kombinationen von Druckparametern für R-PP

Düse	Druckplatte	Schichthöhe	Druckgeschwindigkeit
230 °C	Raumtemperatur	0,3 mm	30 mm/s
240 °C	Raumtemperatur	0,25 mm	30 mm/s
240 °C	80 °C	0,3 mm	30 mm/s
245 °C	80 °C	0,25 mm	30 mm/s
245 °C	85 °C	0,25 mm	30 mm/s
245 °C	90 °C	0,20 mm	30 mm/s
250 °C	90 °C	0,20 mm	30 mm/s
255 °C	90 °C	0,15 mm	30 mm/s
260 °C	80 °C	0,1 mm	30 mm/s

Anmerkung: Die optimalen Kombinationen der Druckparameter sind grün hinterlegt.

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse der Drucktests mit R-PP.



Abbildung 15: Struktur, Muster und Flexibilität von R-PP

Quelle: Eigene Aufnahmen

Ergebnisse Drucktests R-PS:

In Tabelle 13 sind die getesteten Kombinationen von Druckparametern abgebildet. Die optimalen Einstellungen für R-PS im 3D-Druck sind eine Düsentemperatur von 240°C, eine Druckplattentemperatur von 85°C, ein Druckbett aus tefka und eine Schichthöhe von 0,2-0,25 mm bei einer Druckgeschwindigkeit von 30 mm/s.

Aus R-PS können unterschiedliche Muster und Strukturen im 3D-Druck hergestellt werden. Die gedruckte Netzstruktur ist jedoch insgesamt sehr porös und bricht leicht. Das gedruckte Material lässt sich nicht biegen, formen oder drapieren und ist nicht dehnbar. Die Netzstruktur ist luftdurchlässig. Das Gewicht der Materialprobe beträgt bei einer Größe von 9,5*9,5cm etwa 2g. Das Material ist nicht waschtauglich, da die Struktur zu porös ist und leicht bricht.

Tabelle 13: Getestete Kombinationen von Druckparametern für R-PS

Düse	Druckplatte	Schichthöhe	Druckgeschwindigkeit
225 °C	Raumtemperatur	0,25 mm	30 mm/s
230 °C	80 °C	0,2 mm	30 mm/s
235 °C	85 °C	0,2 mm	30 mm/s
240 °C	85 °C	0,2 mm	30 mm/s
240 °C	100 °C	0,25 mm	30 mm/s
240 °C	95 °C	0,25 mm	30 mm/s
240 °C	90 °C	0,25 mm	30 mm/s
235 °C	90 °C	0,25 mm	30 mm/s

Anmerkung: Die optimale Kombination der Druckparameter ist grün hinterlegt.

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildungen 16 und 17 zeigen die Ergebnisse der Drucktests mit R-PS.

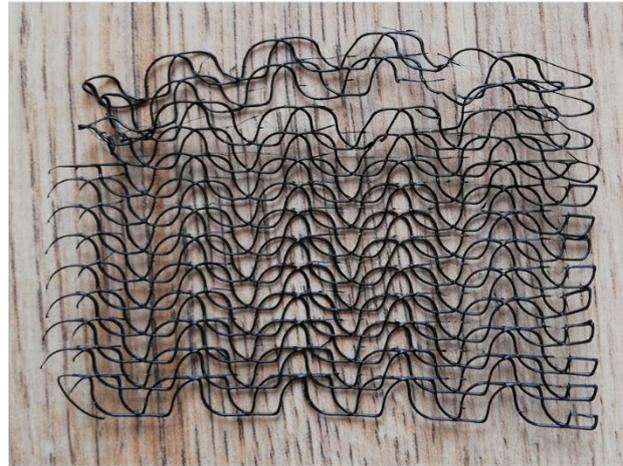


Abbildung 16: Struktur und Muster von R-PS

Quelle: Eigene Aufnahmen

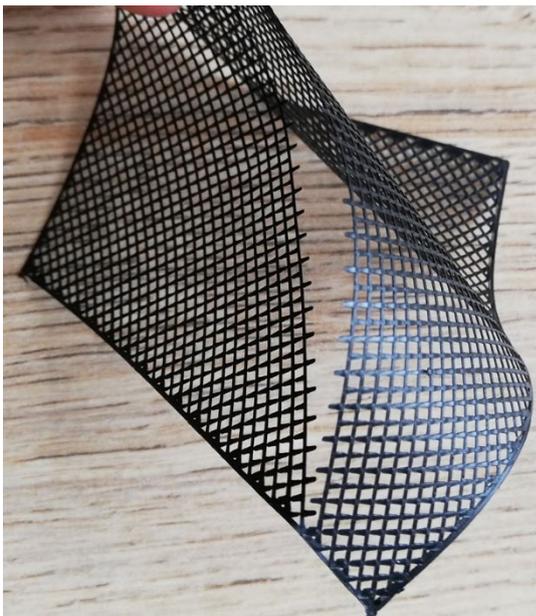


Abbildung 17: Flexibilität von R-PS

Quelle: Eigene Aufnahmen

Ergebnisse Drucktests PHB:

In Tabelle 14 sind die getesteten Kombinationen von Druckparametern abgebildet. Die optimalen Einstellungen für PHB im 3D-Druck sind eine Düsentemperatur von 215°C, eine Druckplattentemperatur von 65°C, ein Druckbett aus MT-Plus oder tefka und eine Schichthöhe von 0,15-0,2 mm bei einer Druckgeschwindigkeit von 30 mm/s.

Aus PHB können unterschiedliche Muster und Strukturen im 3D-Druck hergestellt werden. Die gedruckte Netzstruktur zeigt insgesamt einen hohen Flexibilitätsgrad. Das gedruckte Material lässt sich gut biegen und formen, ist nicht porös und bricht nicht. Es lässt sich flexibel drapieren, verformt sich jedoch ohne weitere Befestigung wieder zurück in den Ausgangszustand. Das Material ist nach dem Druck nicht dehnbar. Die Netzstruktur ist luftdurchlässig. Das Gewicht der Materialprobe beträgt bei einer Größe von 9,5*9,5cm etwa 1,25g und ist somit der leichteste der getesteten Werkstoffe. Das Material zeigte sich im Test waschtauglich.

Tabelle 14: Getestete Kombinationen von Druckparametern für PHB

Düse	Druckplatte	Schichthöhe	Druckgeschwindigkeit
210 °C	60 °C	0,15 mm	30 mm/s
215 °C	65 °C	0,15 mm	30 mm/s
215 °C	65 °C	0,2 mm	30 mm/s
220 °C	70 °C	0,2 mm	30 mm/s
225 °C	70 °C	0,2 mm	30 mm/s

Anmerkung: Die optimalen Kombinationen der Druckparameter sind grün hinterlegt.

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildungen 18 und 19 zeigen die Ergebnisse der Drucktests mit PHB.

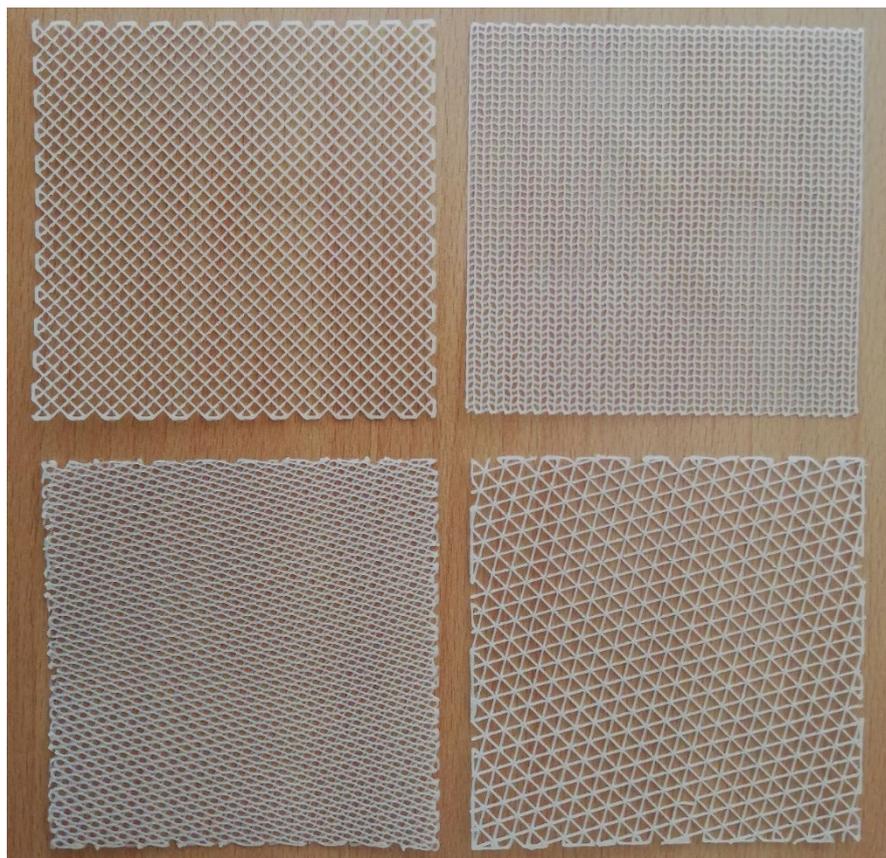


Abbildung 18: Unterschiedliche Muster und Strukturen aus PHB

Quelle: Eigene Aufnahme

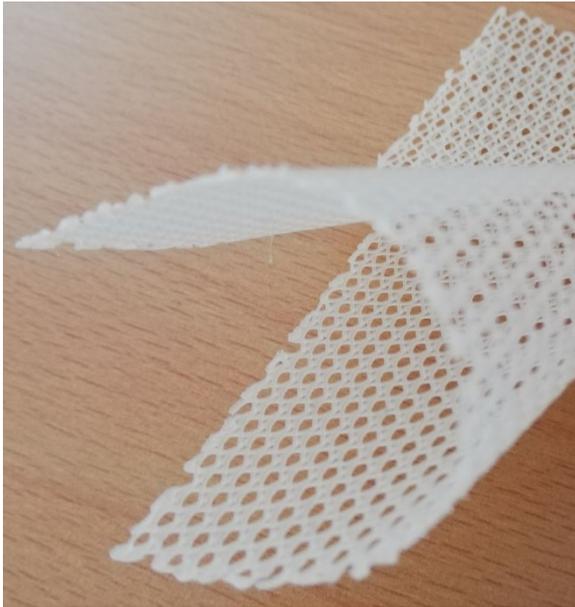


Abbildung 19: Flexibilität von PHB

Quelle: Eigene Aufnahmen

3.3.4 Fazit zur Eignung der getesteten Kunststoffe

Insgesamt zeigen die durchgeführten Drucktests, dass bei Verwendung von TPU und PHB zwar die wesentliche Anforderung der Flexibilität erreicht werden kann, die übrigen Anforderungen allerdings noch nicht erfüllt werden können. Das im Rahmen des Projekts hergestellte R-PP und R-PS eignet sich im Vergleich zu TPU und PHB weniger gut für die Herstellung von Bekleidung. Die Ergebnisse der Drucktests zur Herstellung von Bekleidung mittels 3D-Druck werden in Tabelle 15 zusammengefasst. Der Vergleich mit den Eigenschaften eines klassischen Baumwollstoffs verdeutlicht, dass die im 3D-Drucker hergestellten flexiblen Strukturen deutliche Nachteile gegenüber Baumwolltextilien haben. Keiner der getesteten Kunststoffe kann die Eigenschaften ähnlich gut erfüllen wie ein Produkt aus Baumwolle, sodass in Bezug auf den Einsatz der Technologie zur Herstellung von Bekleidung weiterhin erheblicher Forschungsbedarf besteht. Insbesondere der Einsatz des bioabbaubaren Kunststoffes PHB sollte weiter erforscht werden, da dieser als eine vielversprechende Möglichkeit zur Reduzierung des Eintrags von textilem Mikroplastik in die Umwelt angesehen werden kann.

Tabelle 15: Beurteilung der getesteten Kunststoffalternativen

Anforderungen	TPU	R-PP	R-PS	PHB	Baumwollstoff
Flexibilität	+	-	-	+	++
Dehnbarkeit	--	--	--	--	+
Gewicht (9,5*9,5 cm)	1,5g	2g	2g	1,25g	<1g
Atmungsaktivität	+	+	+	+	++
Waschbarkeit	+	--	--	+	++

Anmerkung: Die Beurteilung der Eigenschaften erfolgte anhand einer 5-stufigen Skala von -- = „Anforderung gar nicht erfüllt“ bis ++ = „Anforderung vollständig erfüllt“

Quelle: Eigene Darstellung

4 Handlungsempfehlungen

Auf Grundlage der zuvor vorgestellten Forschungsarbeiten werden im folgenden Handlungsempfehlungen abgeleitet, mit denen ein effizienteres Recycling von Kunststoffverpackungen entlang der textilen Lieferkette erreicht werden könnte. Dabei wird zwischen kurz- und mittelfristigen sowie langfristigen Maßnahmen unterschieden. Bei den kurz- und mittelfristigen Maßnahmen handelt es sich um sogenannte „low-hanging fruits“, welche bei einem vergleichsweise geringen Aufwand bereits einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung des Status Quo leisten könnten. Die langfristigen Maßnahmen erfordern dahingegen umfassendere Veränderungen und sollten entsprechend in die langfristige Unternehmensstrategie eingebettet werden.

4.1 Kurz- und mittelfristig umsetzbare Maßnahmen

Die Analyse des Status Quo in Bezug auf das Kunststoffrecycling entlang der textilen Lieferkette zeigt, dass am PoS bislang keine Infrastruktur für eine sortenreine Entsorgung verschiedener Kunststoffverpackungen besteht. Die Entsorgung erfolgt meist über das Duale System, bei dem jedoch nur ein geringer Anteil der Abfälle hochwertig recycelt wird (Heinrich-Böll-Stiftung & Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland 2019). Eine Voraussetzung für die Etablierung einer sortenreinen Entsorgung ist eine strikt sortenreine Trennung der Abfälle am PoS, die bislang aufgrund des hohen Aufwands nur in Ausnahmefällen vorgenommen wird. Eine zeitnah umzusetzende Maßnahme zur Realisierung eines verbesserten Recyclings von Kunststoffverpackungen entlang der textilen Lieferkette ist daher das störstofffreie Sortieren von Verpackungsmaterial aus Kunststoff und eine getrennte Sammlung der sortierten Abfälle. Dies ist auch eine Voraussetzung für die Umsetzbarkeit der zuvor vorgestellten Recyclinganlage im Rahmen des „FATM-Konzeptes“. Folgende Maßnahmen können zu einer sortenreinen Trennung und Entsorgung der Kunststoffabfälle innerhalb der Lieferkette und am PoS beitragen:

- Die in der Lieferkette verwendeten Polybeutel sollten keine Aufkleber, Bedruckung oder sonstigen Störstoffe aufweisen. Markierungen sollten stattdessen am besten durch Laserdruck vorgenommen werden. Darüber hinaus können digitale Wasserzeichen verwendet werden. Diese erleichtern das Erkennen und sortenreine Sortieren der Verpackungen in den Recyclinganlagen (Ellen MacArthur Foundation 2020).
- Nicht vermeidbare Aufkleber, z.B. zum Handling der Ware notwendige Lieferscheine und Etiketten, sollten in die Polybags gelegt werden. Wenn dies aus Handhabungszwecken nicht möglich ist, sollten die Aufkleber aus dem gleichen Material wie die Verpackung bestehen. Alternativ sollten solche Klebstoffe gewählt werden, bei denen sich Aufkleber leicht und rückstandsfrei von der Verpackung ablösen lassen.
- Den Empfänger der Verpackung (sowohl innerhalb der Lieferkette als auch am PoS) sollten durch eine entsprechende Kennzeichnung die fachgerechte Entsorgung der Verpackung erläutert werden.
- Zentrale Sammelstellen für spezifische Kunststoffabfälle, z.B. am PoS, sollten eingerichtet werden, damit die Ressourcen effizient zurückgewonnen werden können. Die Sammelstellen sollten insbesondere auch von Verbrauchern genutzt werden können. So könnten

bspw. Verpackungen aus dem Online-Handel, insb. Polybags und Kleiderbügel, einer geeigneten Verwertung zugeführt werden.

- Bei der Beschaffung von Verpackungsmaterialien sollte generell ein Fokus auf die Auswahl von Monomaterialien gelegt werden. Die Agierenden in der Lieferkette (insbesondere die BekleidungsHersteller) sollten also Kunststoffverpackungen (Polybags) aus sortenreinem und recyclingfähigem Material bevorzugen. Ebenso wird die Verwendung von Polybags aus recyceltem Kunststoff empfohlen.⁹
- Der Einsatz der Lasertechnologie zur Kennzeichnung von Verpackungen sollte weiter erforscht werden. Diese Technologie könnte gegebenenfalls zur Aufbringung von Barcodes genutzt werden, sodass auf Klebeetiketten verzichtet werden könnte und ein weiterer Beitrag zur Sortenreinheit geleistet werden könnte.

Darüber hinaus haben die Forschungsarbeiten gezeigt, dass aufgrund der starken internationalen Fragmentierung der textilen Lieferkette die Entsorgungswege der Kunststoffverpackungen auf den vorgelagerten Stufen der Lieferkette nicht immer nachvollziehbar sind. Um den Anteil der Verpackungen, die einem hochwertigen Recyclingprozess zugeführt werden, auch vor dem PoS zu erhöhen, könnten Hersteller oder große Handelsunternehmen verbindliche Entsorgungsrichtlinien definieren. Somit wäre eine Ausweitung der Verantwortung auf vor- und nachgelagerte Stufen der Lieferkette möglich.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der Forschungsarbeiten, dass Verbrauchern die Wichtigkeit der sortenreinen Trennung häufig nicht bewusst ist. Daher sollten kurzfristig Maßnahmen zur Verbraucheraufklärung in Bezug auf Recycling von Kunststoffabfällen etabliert werden. Die zuvor vorgestellte Recyclinganlage könnte als unterstützendes Instrument zur Bewusstseins-schaffung bei den Konsumenten eingesetzt werden. Die Anlage veranschaulicht, dass Kunststoffabfälle wertvolle Ressourcen sind, die bei entsprechender Aufbereitung einen neuen Zweck erfüllen können. Als Gemeinschaftsprojekt von Kommunen und Handel könnten die Kosten derartiger Projekte geteilt werden und somit Barrieren bei der Umsetzung verringert werden. Im Zuge der wachsenden Anwendungsbereiche von 3D-Druck wird empfohlen, die Eignung der am PoS anfallenden Verpackungen zur Herstellung von Filament weiter voranzutreiben. Die Forschungsarbeiten haben ergeben, dass eine Verarbeitung der Abfälle zu Filament möglich ist. Die damit eröffneten Einsatzmöglichkeiten sollten mittelfristig entsprechend genutzt werden.

4.2 Langfristig umsetzbare Maßnahmen

Neben den kurz- und mittelfristig umsetzbaren Maßnahmen wird außerdem empfohlen, in langfristige Strategien zu investieren und insbesondere unternehmens- sowie branchenübergreifende Kooperationen zu forcieren. Dies kann unternehmensseitig beispielsweise durch die im Folgenden dargestellten Maßnahmen realisiert werden:

- Eine branchenweite Einigung auf einheitliche Materialien und Materialstandards für Verpackungen in der textilen Wertschöpfungskette. Dies könnte zu einer Erhöhung der Recyclingquote von Kunststoffverpackungen (z.B. Polybags) beitragen.

⁹ Weitere Details zur Bewertung von Polybag-Alternativen sind im Business Case „Eine betriebswirtschaftliche Analyse des Vermeidungspotentials von Kunststoffverpackungen innerhalb der textilen Lieferkette“ nachzulesen. Der Bericht ist abrufbar unter www.fatm.de

- Branchenübergreifende Kooperationen aller Agierenden der Bekleidungslieferkette sowie der Recyclingindustrie, um Anreize für gemeinsame Recycling-Strategien bei gleicher Lastenverteilung zu setzen. Hierfür wird empfohlen, sich an bereits bestehenden Projekten zu orientieren, wie z.B. dem Single Use Plastics Project der European Outdoor Group.
- Gegenseitige Unterstützung innerhalb der Brancheninitiative bei der Suche nach Anbietern und beim Einkauf von Verpackungsmaterialien aus recycelten Kunststoffen. Dadurch könnte die Entwicklung qualitativ hochwertiger und robuster Kunststoffprodukte speziell für die Bekleidungsindustrie gefördert werden.
- Die Etablierung einer zentralen Projektstelle, die zwischen den Unternehmen in der Branche vermittelt und von diesen gemeinsam finanziert wird. Diese könnte dabei helfen, ein effizienteres Recycling zu realisieren, indem die einzelnen Projekte besser miteinander vernetzt werden und Wissen zentralisiert wird.
- Darüber hinaus sollte die Nutzung der 3D-Druck-Technologie für die Herstellung von Bekleidung weiter erforscht werden. Die in diesem Business Case vorgestellten Drucktests zeigen, dass unterschiedliche Materialien zur Herstellung von Bekleidung aus dem 3D-Druck grundsätzlich geeignet sind, die technologischen Rahmenbedingungen jedoch noch verbessert werden müssen. Langfristig wäre durch den Einsatz der 3D-Druck-Technologie ein Closed-Loop-Recycling von Bekleidung denkbar.

4.3 Regulatorische Maßnahmen

Um geeignete Anreize für ein hochwertiges Recycling entlang der textilen Lieferkette zu setzen, wird neben den Handlungsempfehlungen für Unternehmen und Verbraucher auch eine stärkere regulatorische Einflussnahme vorgeschlagen. Insgesamt ist in den vergangenen Jahren zwar sowohl auf nationaler als auch europäischer Ebene der Wille zu einer verstärkten gesetzlichen Grundlage zum Einsatz von Kunststoffverpackungen erkennbar, dennoch bleiben die Vorgaben meist noch unkonkret oder deren Umsetzung auf nationaler Ebene ist bislang nicht definiert worden. Die EU Kommission hat im Rahmen des European Green Deals (EGD) das ambitionierte Ziel gesetzt, Europa bis 2050 zu einem klimaneutralen Kontinent zu machen. Bisweilen ist jedoch nicht festgelegt, durch welche Maßnahmen dieses Ziel erreicht werden soll. Im Folgenden sollen daher konkrete Maßnahmen vorgeschlagen werden, deren Umsetzung zur Erreichung der im EGD der Europäischen Union festgesetzten Klimaziele beitragen könnten.

Unter dem Stichwort *Nachhaltige Industrie* beinhaltet der EGD das Ziel, dass bis 2030 alle Verpackungen in der EU wiederverwendbar oder recycelbar sein sollen, sofern dies *wirtschaftlich zumutbar* ist. Dabei soll der Schwerpunkt der Maßnahmen explizit auf den Textilsektor und den Kunststoffsektor gelegt werden, welche als *ressourcenintensive Sektoren* eingestuft werden. Aus den im vorliegenden Business Case präsentierten Forschungsarbeiten ergibt sich für eine Verbesserung des Recyclings von Kunststoffabfällen entlang der textilen Lieferkette die Empfehlung, Hersteller von Kunststoffverpackungen zur Verwendung von Monomaterialien zu verpflichten. Auch eine Beschränkung auf bestimmte Kunststoffe ist in Betracht zu ziehen. Wenn nur eine geringe Anzahl verschiedener Werkstoffe als Verpackungsmaterial in der Textilindustrie zugelassen wäre, könnten getrennte Entsorgungsinfrastrukturen leichter aufgebaut und somit ein qualitativ hochwertiges Recycling ermöglicht werden. Notwendige Voraussetzung dafür ist eine getrennte Sammlung der unterschiedlichen Kunststoffe, welche nur bei

einer streng limitierten Anzahl zulässiger Werkstoffe sichergestellt werden kann. Als Vorbild kann hier der Recyclingkreislauf von Polyethylenterephthalat (PET) dienen. Durch ein einheitliches Pfandsystem kann PET mittlerweile getrennt gesammelt und hochwertig recycelt werden. Ähnliche Strukturen sollten auch für Verpackungen in der Textilindustrie etabliert werden, da sich hier aufgrund eines potenziell möglichen geringen Verschmutzungsgrads und hohen Mengen an Kunststoffverpackungen vielversprechende Voraussetzungen für ein hochwertiges Recycling bieten. Eine entsprechende gesetzliche Grundlage sollte daher die als Verpackungen in der Textilindustrie zulässigen Kunststoffmaterialien stark beschränken und eine ausschließliche Verwendung von Monomaterialien anordnen. Auch ein Verbot von Farbstoffen in Verpackungen könnte zu einem verbesserten Recycling beitragen. Einerseits würde es die Erkennung in bestehenden Sortieranlagen erleichtern, sodass weniger Kunststoffe der thermischen Verwertung zugeführt würden. Andererseits könnte so die Anzahl der potenziell möglichen Recyclingkreisläufe einer Verpackung gesteigert werden. In Bezug auf den Zusatz, dass die Verwendung von wiederverwendbaren oder recycelbaren Verpackungen *wirtschaftlich zumutbar* sein muss, sollten regulatorische Maßnahmen darauf abzielen, wiederverwendbare und recycelbare Verpackungen wettbewerbsfähiger zu machen. Als geeignete Maßnahme wird hier in Anlehnung an das EU-weite Verbot von bestimmten Einwegprodukten aus Kunststoff beispielsweise eine Besteuerung von Einwegverpackungen vorgeschlagen.

Zusätzlich sollte neben der Verwendung von wiederverwendbaren und recycelbaren Verpackungen auch die Nutzung von Verpackungen aus Recyclingkunststoff gefördert werden. Um Recyclingkunststoffe wirtschaftlich wettbewerbsfähig zu machen, müssten diese im Vergleich zu Primärkunststoff kostengünstiger werden. Während mit einer allgemeinen Steuer auf Rohöl auch externe Effekte wie z.B. ein Anstieg von Heizkosten für private Verbraucher einhergehen würden, könnte mit einer spezifischen Steuer auf Ethylen, Butylen und Propylen als Ausgangsprodukte für die Kunststoffproduktion eine gezieltere Verteilung der Steuerlast erreicht werden. Somit könnte der Preis für Primärkunststoffe gezielter beeinflusst werden.

5 Fazit

Vor dem Hintergrund der stetig wachsenden Umweltverschmutzung durch Kunststoffabfälle gewinnt ein qualitativ hochwertiges Recycling zunehmend an Bedeutung. Die vorliegende Untersuchung verdeutlicht, welche Bedeutung Kunststoffverpackungen in der textilen Lieferkette haben und wie die Recyclinginfrastrukturen innerhalb dieser ausgestaltet sind. Es zeigt sich, dass erhebliches Potenzial für eine Verbesserung des Recyclings von Kunststoffverpackungen in der Industrie besteht. Während durch die Umsetzung von „low-hanging fruits“ bereits mit einfachen Mitteln Verbesserungen erzielt werden können, sind für tiefgreifende Veränderungen in den etablierten Recyclingprozessen unternehmens- und branchenübergreifende Kooperationen und eine Ausweitung der bestehenden Gesetzgebung notwendig.

Die vorgestellte Recyclinganlage zur Verwertung von Kunststoffabfällen am PoS zeigt, dass die Verpackungen in der textilen Lieferkette von einer hohen Rohstoffqualität sind und sich bei sortenreiner Trennung zur Herstellung von Filament und Produkten im 3D-Druck Verfahren eignen. Sowohl aus betriebswirtschaftlicher als auch ökobilanzieller Sicht kann das Konzept der Recyclinganlage als vorteilhaft eingestuft werden. Gleichzeitig wird auf die Aufklärungsfunktion einer solchen Anlage verwiesen. Da bei Verbrauchern in vielen Fällen ein geringes Bewusstsein für korrekte Entsorgungswege von Kunststoffverpackungen und die Wichtigkeit eines hochwertigen Recyclingprozesses besteht, kann durch den Betrieb der vorgestellten Anlage der Recyclingprozess transparent gemacht und den Verbrauchern nähergebracht werden. Diese Bewusstseins-schaffung ist erforderlich, da nur durch eine flächendeckend sortenreine Trennung der Abfälle langfristig ein hochwertiger Recyclingkreislauf auf nationaler und internationaler Ebene etabliert werden kann.

Anhang A: Status quo Nutzung von 3D-Druck zur Herstellung von Textilien

Produktionsverfahren 3D-Druck von Textilien - Anbieter	
Zusammenfassung	
<ul style="list-style-type: none"> – Keine einheitlichen Produktionsverfahren unter Modedesignern, Verwendung von verschiedenen Materialien, Druckern und Technologien – Kein Produktionsverfahren (außerhalb der Sportschuhindustrie), das Massenproduktion ermöglicht – 3D-gedruckte Kleidung ist durch Einschränkungen wie Kosten und geeignete Druckmaterialien im Produktionsverfahren noch nicht kommerziell verbreitet – 3D-Druck Entwicklung stark innerhalb der Sportschuh-Industrie <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sportschuhhersteller gehen Kooperationen mit Unternehmen mit 3D-Druck-Expertise ein (z. B. Carbon, BASF) und entwickeln spezielle Produktionsverfahren, die an Produktanforderungen angepasst sind ▪ Anreiz des Produktionsverfahrens: 3D-Druck hat Kostenvorteil, d.h. Produktion muss nicht in Niedriglohnländern erfolgen, sondern es kann auch in Industrienationen produziert werden (Spiewak 2017) – Zwei Unternehmen, die sich mit 3D-Druck-Produktionsverfahren speziell für die Bekleidungsindustrie beschäftigten, haben ihre Aktivitäten dazu eingestellt (Gründe: Probleme mit Technologie und mangelnde Nachfrage) 	
Wer und Was	Produktionsverfahren
Modedesigner/-unternehmen	
<p>Danit Peleg verkauft 3D-gedruckte Jacken, die aus dreieckigen, aneinanderhängenden Mustern bestehen und von Kunden angepasst werden können Preis: 1500€ (Danit Peleg 2020)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Experimentierte erst mit PLA, verwarf das Material jedoch, da es zu unflexibel ist (Danit Peleg 2021) ▪ Verwendet nun Material FilaFlex, welches den Druck von Bekleidung, die flexibler und robuster ist als herkömmliche Plastik-, Kunstharz- oder Nylon-Filamente, ermöglicht (Sirch 2016) ▪ Experimentierte mit verschiedenen Druckern, wie Makerbo und Prusa, entschied sich für Witbox (Danit Peleg 2021)
<p>Julia Daviy Präsentierte 2018 ihre erste Kollektion flexibler und tragbarer Kleidung, die digital erstellt und vollständig auf industriellen 3D-Druckern gedruckt wurde (Julia Daviy 2020)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Benutzt für Kollektionen sowohl großformatige 3D-Drucker (3D FDM) als auch SLA 3D-Drucker (z. B. für Kleid aus organischem Organza-Futter und Ahimsa-Seide) ▪ Experimentierte mit sehr flexiblen Filamenten, heutzutage nutzt sie 70A TPE (100% recycelbar), bei SLA experimentierte sie mit flexiblem Harz und Silikon (3Dnatives 2019)
<p>Ministry of Supply T-Shirts, die eine nahtlos gestrickte Viskose-/PBT-Mischung enthalten und sich an den Körper anpassen (Ministry of Supply 2020)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verwendet 3D-Print-Knit-Technik, ein dem 3D-Druck ähnliches Verfahren

<p>Modeclix Modeclix ist ein 3D-gedrucktes Textil, das zur Herstellung verschiedener Produkte verwendet werden kann, von Kleidung und Accessoires bis hin zu Spielzeug und Innendekoration, Modeclix besteht aus einer einfachen Verbindungskomponente, die lokal als Bahnen aus flexiblem Material hergestellt werden kann (Modeclix 2020)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unter Verwendung der Laser-Sinter-Additiv (LSA)-Fertigungstechnologie werden mehrere ineinandergreifende Kunststoffstücke zu verschiedenen Bekleidungsstücken zusammengefügt (Von Pentz 2017) ▪ Wird aus weißem Nylonpulver hergestellt und kann in jeder beliebigen Farbe eingefärbt werden, kann kundenspezifisch angepasst und auf Anfrage über ein lokales Netzwerk von 3D-Druckbüros hergestellt werden (Modeclix 2020)
Sportschuh-Marken	
<p>Adidas Seit 2017 Kooperation mit 3D-Druck-Unternehmen Carbon, arbeiten zusammen in sogenannter SPEED-FACTORY an der Massenproduktion von 3D-gedruckten Sohlen (Thum 2018)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sohle wird nicht Schicht für Schicht erstellt, sondern kontinuierlich aufgetragen → ermöglicht Druck von Harzteilen in einer enormen Geschwindigkeit ▪ Herkömmliche 3D-Druckverfahren auf Harzbasis erzeugen schwache, spröde Teile, Kohlenstoff überwindet dies, indem eine zweite wärmeaktivierte programmierbare Chemikalie in das Material eingebettet wird → dadurch entstehen hochauflösende Teile mit ingenieurmäßigen mechanischen Eigenschaften. ▪ CLIP (Continuous Liquid Interface Production) ist ein photochemischer Prozess, bei dem flüssiges Kunststoffharz mit Hilfe von ultraviolettem Licht zu festen Teilen ausgehärtet wird. Funktioniert, indem Licht durch ein sauerstoffdurchlässiges Fenster in ein Reservoir mit UV-härtbarem Harz projiziert wird. Wenn eine Folge von UV-Bildern projiziert wird, verfestigt sich das Teil und die Bauplattform erhebt sich (Carbon 2020)
<p>Nike Veröffentlichte 2017 „VapoFly 4%“, den ersten Schuh von Nike, bei dem mehr als nur die Sohlen 3D-gedrukt sind, Nike „VaporFly Elite Flyprint 3D“ (2018) besteht aus 3D gedrucktem Gewebe, welches wasserabweisend ist (3Druck 2018)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ TPU-Faden wird von einer Spule abgewickelt, geschmolzen und in unterschiedlichen Lagen aufeinandergelegt (Zierer 2020)
<p>Reebok Liquid Factory (2016): Reebok veröffentlichte in Zusammenarbeit mit BASF einen Schuh mit 3D-gedruckter Sole (Lord 2018)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3D-Druck, bei dem ein proprietäres flüssiges Material verwendet wird, um Schuhkomponenten in 3D-Schichten zu zeichnen ▪ BASF entwickelte Flüssigkeit auf Urethanbasis, um die Eliminierung von „molds“ zu unterstützen, diese wird auf gesamten Schuh als Laufsohle aufgetragen, was zu einer dreidimensionalen Passform führt (Spiewak 2017)

<p>New Balance Kooperation mit 3D-Druck-Unternehmen Formlabs wurde 2017 vorgestellt (Essop 2019)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Neues 3D-Druckmaterial (Rebound Resin) und Produktionssystem (Formlabs 2020) ▪ Rebound Resin: fünffache Reißfestigkeit, dreifache Zugfestigkeit und zweifache Dehnung im Vergleich zu anderen auf dem Markt erhältlichen Elastomer-Materialien in Produktionsqualität → Rebound Resin perfekt geeignet für den 3D-Druck federnder, elastischer Teile (Formlabs 2021) ▪ Vorteil der Anwendung des 3D-Drucks bei der Herstellung der Sohle besteht darin, dass die Verwendung von Gussformen, die den Produktentwicklungsprozess verlängern und zusätzliche Kosten verursachen können, überflüssig wird (Essop 2019)
<p>3D-Druck Unternehmen, die sich mit Produktionsverfahren beschäftigten</p>	
<p>Cubify (3DSystems) Kommerzielles 3D-Druckunternehmen, stellte 2015 Modell „Fabricate“ vor, welches speziell für Bekleidungsdesigner entwickelt wurde (Pasricha & Greeninger 2018)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fabricate ermöglichte die Verwendung von Textilmaterial, um Kleider, Verzierungen und Accessoires mit einem individuellen Flair zu kreieren, Starter Pack war für \$1.199 erhältlich (Goehrke 2018) ▪ Projekt wurde 2019 eingestellt (Stevenson 2019)
<p>Electroloom</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Brachte 2015 Drucker auf den Markt, der Kleidung mit Elektrizität und Rohmaterialien im Elektrospleinverfahren herstellen sollte ▪ Problem stellte der entstandene Stoff dar → war zwar weich und fühlte sich wie eine Art Wildleder an, aber Schichten des Stoffes begannen schnell an der Oberfläche zu fransen und waren anfällig für Verformungen und Risse ▪ Bei Versuch Stoff zu optimieren wurde erkannt, dass dies unmöglich ist ▪ Start-up wurde eingestellt (Cooper 2017)

Produktionsverfahren 3D-Druck von Textilien - Forschungsprojekte	
Zusammenfassung	
<ul style="list-style-type: none"> – Studie von Samantha Vettese Forster zeigt, dass Textilabfälle in Kombination mit 3D-Druck wiederverwendet werden können, um neue Textilprodukte zu schaffen. Getestet wurde ein Produktionsverfahren, bei dem ein druckfähiges 3D-Material aus pulverisierter Zellulose und flexiblem PLA hergestellt wurde – Emma Grain befasst sich damit, wie Textilien durch rPET im 3D-Druck hergestellt werden können (eher Zukunftsvision, da es dazu aktuell noch kein geeignetes Produktionsverfahren gibt) – Tamicare schafft eigene 3D-Technologie, bei der durch Zusammensetzen von Materialien in einer schnellen Schichttechnologie neue Stoffe, u. a. auch aus recycelten Fasern und recycelten Polymeren, hergestellt werden – <i>Ethical Filament</i> bescheinigt im Stil von <i>Fair Trade</i> als weltweit anerkannte Marke die ethischen Referenzen der Beschaffung und Produktion von Filamenten aus recycelten Materialien – Einsatzbereiche sind bis jetzt noch eher gering 	
Was / Studie	Produktionsverfahren
<p>Vettese Forster, S. (2017): 3D Printable Recycled Textiles: Material Innovation and a Resurrection of the Forgotten “shoddy” Industry. <i>Journal of Textile and Design Research and Practice</i>, 5(2), 138-156.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Projekt, das Abfälle aus der schottischen Textilindustrie verwertet und in Kombination mit PLA ein 3D-druckbares Filament geschaffen hat → Textilabfälle wurden mit biologisch abbaubarem Primär-PLA gemischt ▪ Material ist für nachhaltige Eigenschaften und biologische Abbaubarkeit bekannt <ul style="list-style-type: none"> – PLA ist als vielseitiges und erfolgreiches Material für additive Fertigung bekannt – Prozess hätte möglicherweise auch mit recyceltem PLA funktioniert ▪ Shoddy ist ein Wolltextil, das aus den geschredderten Fasern von Recyclingwolle zusammengesponnen wird ▪ Forschungsteam erhielt Textilabfälle aus Mischfaserewebe, reinem Wollgewebe, Kaschmir und recyceltem Leder ▪ Produktionsverfahren: Mithilfe eines Verfahrens (Erstellung eines druckfähigen 3D-Materials aus pulverisierter Zellulose und flexiblem PLA) wurden Woll-, Kaschmir-, und Lederstücke zwischen PLA-Blätter laminiert, zu Granulat verarbeitet und dann zu einem Filament gepresst ▪ Es wurden zwei Arten von Filamenten hergestellt: eines aus flexiblem PLA und eins aus konventionellem PLA - letzteres produzierte ein Filament, welches einen besseren Druck ermöglichte ▪ Kann in Zukunft in Massenproduktion hergestellt werden → Die im Projekt verwendeten Textilabfälle können in großen Mengen verwertet werden
<p>Grain, E. (2016): 3D Printing Fashion With Recycled Polyester: A Sustainable Journey. IFFTI - BIFT 2016 International Conference.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3D-Druck mit recyceltem Filament aus rPET und Polyester → Material, das bereits zur Herstellung von Kleidung genutzt wird ▪ Anmerkung: rPET für 3D-Druck wurde von Unternehmen REFIL hergestellt - das Unternehmen wurde allerdings aufgrund anhaltender technischer Schwierigkeiten und enttäuschender Verkaufszahlen eingestellt (Refil 2021)

<p>Tamicare Entwickelte COSYFLEX, eine additive Herstellungstechnologie für Textilien - bei der Herstellung von Cosyflex können problemlos recycelte Fasern und recycelte Polymere verwendet werden (Tamicare 2021)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzung der schnellen Deposition von flüssigen Polymeren, echten Textilfasern und Zusatzstoffen auf textilen Strukturbildnern (Tamicare 2020) ▪ Cosyflex-Gewebe werden durch Zusammensetzen von Materialien in einer schnellen Schichttechnologie hergestellt (Tamicare 2021) ▪ Durch schnelles Schichten von kurzen, echten Textilfasern (auch aus Abfällen) und Polymeren auf Wasserbasis durch ein proprietäres, patentiertes Verfahren entsteht das Cosyflex-Gewebe mit Fasern auf beiden Seiten und echtem Gewebeaussehen und -gefühl (Tamicare 2021)
<p>Adidas Stellte 2015 in Zusammenarbeit mit Parley for the Oceans den vollständig 3D-gedruckten Schuh „UltraBOOST UNcaged Parley“ vor, welcher zu 95% aus Müll aus dem Ozean und zu 5% aus recyceltem Polyester bestand (Koslow 2016)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prototyp-Schuh wurde mit additiver Fertigung hergestellt - die 3D-Druck-Technologie wurde dann allerdings durch eine neue Technologie ersetzt, die sich besser für die Massenproduktion eignete
<p>Ethical Filament (Ethical Filament 2020) (Kein Produktionsverfahren)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Das Ethical Filament Trademark soll als weltweit anerkanntes Zertifikat im Stil von <i>Fair Trade</i> die ethischen Referenzen der Beschaffung und Produktion von Filamenten bescheinigen ▪ Aufbau der Koordination und Zusammenarbeit mit lokalen Unternehmern, um 3D-Druck-Filamente aus recycelten Abfallmaterialien herzustellen

Technische Tests zum 3D-Druck von Textilien aus bioabbaubarem PHB	
Zusammenfassung	
<ul style="list-style-type: none"> – Für den 3D-Druck von Textilien aus PHB wurde keine wissenschaftliche Arbeit gefunden, sondern nur über den allgemeinen 3D-Druck mit PHB – Mehr PHB in Kombination mit PLA führt zu einer höheren Kristallinität, besserer Hitzebeständigkeit und weniger Energieverbrauch durch Drucken bei niedrigeren Temperaturen – TPU kann für den 3D-Druck von Textilien verwendet werden - es ist flexibel und passt sich an die Körperform an, kann aber auch leicht brechen und ist porös – Häufig genannt werden PLA, ABS und TPU 	
Studie / Quelle	Inhalt
3D-Druck mit PHB (in Kombination mit PLA)	
<p>Wang, S., De Clerck K., Cardon, L. (2018): Polylactic acid/poly-3-hydroxybutyrate applications in Extrusion based Additive Manufacturing. International Conference on Polymers and Moulds Innovations-PMI 2018. Institute of Polymers and Composites, University of Minho, Portugal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bei Zugabe von mehr PHB in die PLA/PHB-Mischung sinkt Schmelzindex → Proben können bei niedrigerer Temperatur 3D-gedruckt werden, wodurch Energie gespart wird ▪ PHB hat schlechte Haftung auf dem Druckbett aufgrund von Verzug und Schrumpfung → PLA wurde hinzugefügt, um die Haftung zu verbessern → Es wurde festgestellt, dass der PHB-Gehalt nicht mehr als 60 Gew.-% betragen sollte, um Proben mit guter Druckqualität zu erhalten ▪ Mehr PHB führt zu einer höheren Kristallinität, besserer Hitzebeständigkeit und weniger Energieverbrauch durch Drucken bei niedrigeren Temperaturen ▪ Reines PHB ist jedoch kein guter Kandidat für kostengünstige, stranggepresste additive Fertigung
<p>Wang, S., Daelemans, L., Fiorio, R., Gou, M., D'hooge, D. R., De Clerck, K., Cardon, L. (2019): Improving mechanical properties for extrusion-based additive manufacturing of poly (lactic acid) by annealing and blending with poly (3-Hydroxybutyrate). Polymers, 11(19), 1529.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PLA wurde typischerweise mit einem Einstellwert von 210 Grad gedruckt; die PLA/PHB-Mischung wurde bei 190 Grad gedruckt, einer Temperatur, bei der PHB eine gute Fließfähigkeit aufweist und die mechanischen Eigenschaften für die Materialien optimal waren ▪ Muster wurden in guter Qualität gedruckt und zeigen nach dem Ausglühen keine Umhüllung → Das Mischen von PLA mit PHB ermöglichte eine Senkung der Drucktemperatur und verbesserte die Zähigkeit des Materials ▪ Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass das Mischen von PLA mit PHB die Schlagzähigkeit, die Zugfestigkeit und die <i>Vicat Softening</i>-Temperatur (VST) von PLA verbesserte ▪ Außerdem verleiht PHB PLA ohne Nachbehandlung eine hohe VST und eine bessere Zähigkeit, wodurch Zeit und Energie gespart werden konnte
3D-Druck von Textilien mit TPU	
<p>Kim, S., Seong, H., Her, Y., Chun, J. (2019): A study of the development and improvement of fashion products using a FDM type 3D printer. Fashion and Textiles, 6(9), 1-24.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ TPU ist aufgrund der Flexibilität und Textur für die Bekleidungsherstellung von Vorteil ▪ TPU-Filament eignet sich, um eine dem menschlichen Körper besser angepasste Form der Kleidung zu schaffen ▪ Flexibles TPU bietet eine glatte Oberfläche

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ TPU hat eine Beschränkung bei der Erstellung verschiedener Designs, wie z.B. ein Design mit starken Kurven, da es schwierig ist, die Stützen (vom 3D-Drucker) zu entfernen → aufgrund seiner Viskosität haftet TPU an der Düse, wenn die Extruder-Temperatur sinkt und führt leicht zu Verstopfungen. ▪ TPU kann leicht brechen oder sich lösen → erheblicher Zeitaufwand für Anziehen von Kleidung erforderlich, da große Vorsicht geboten ist → Träger kann nicht frei sitzen oder sich bewegen ▪ Ein neues Kleid mit 3D-Druck 'Loom' wurde von der Designerin Maria Alejandra Mora-Sanchez und Cosine Additive entwickelt
Lee, S. H. (2015): Morphology and Properties of Textiles Manufactured by Three-Dimensional Printing Based on Fused Deposition Modeling. Textile Science and Engineering, 52(4), 272-279.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Test von drei verschiedenen PLA Filamenten und einem TPU Filament ▪ Bestätigung der Anwendbarkeit des 3D-Drucks im Schmelzschichtverfahren für die Herstellung von Textilien mit TPU-Filament
Han, Y., Kim, J. (2018): A Study on the Mechanical Properties of Knit Fabric Using 3D Printing Focused on PLA, TPU Filament. Journal of Fashion Business, 22(4), 93-105.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ TPU ist aufgrund seiner Flexibilität deutlich besser für die Herstellung von Textilien im 3D-Druck geeignet als PLA ▪ TPU lässt sich leichter spannen und erholt sich besser von einer Zugverformung als PLA
3D-Druck von Textilien: Zusammenfassung von PLA, ABS und TPU	
Kim, S., Seong, H., Her, Y., Chun, J. (2019): A study of the development and improvement of fashion products using a FDM type 3D printer. Fashion and Textiles, 6(9), 1-24.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3D-Drucker vom Typ FDM können nur feste Materialien wie ABS, PLA und TPU verwenden ▪ PLA wird aufgrund seiner Festkörpereigenschaften häufig in verschiedenen Bereichen eingesetzt, eignet sich jedoch nicht für die Herstellung von Modeartikeln, da es weniger robust und schwieriger zu entfernen ist als ABS ▪ Vollmaterialwerkstoff ABS bietet hohe Fertigungsqualität, muss aber wegen der beträchtlichen Oberflächenrauheit nachbehandelt werden ▪ TPU bietet glattere Oberfläche, aber es ist schwierig, die Träger zu entfernen, wenn es zusammen mit diesem Material bedruckt wird ▪ ABS ist fester und wirtschaftlicher als TPU und lässt sich leicht von der Stützstruktur entfernen ▪ ABS und TPU können leicht brechen oder sich lösen ▪ Bei ABS ist ein Verfahren zum Glätten scharfer Teile der Oberfläche erforderlich ▪ TPU muss, da es nicht geschliffen werden kann, individuell zugeschnitten werden → Größtes Problem, das während des Herstellungsprozesses auftritt, da es Herstellungszeit erhöht und den Druckprozess erschwert

Anforderungen an Beschaffenheit von 3D-gedruckten Textilien und technische Möglichkeiten	
Zusammenfassung	
<ul style="list-style-type: none"> – 3D-gedruckte Textilien müssen flexibel, drapierbar, dehnbar und bequem sein, ein geringes Gewicht haben, sowie atmungsaktiv, waschmaschinentauglich und bügeltauglich sein – Für die Herstellung von 3D-gedruckten Kleidungsstücken besteht Bedarf an Entwicklung neuer Filamente, um Eigenschaftsanforderungen an Textilien zu erfüllen → mit hohen Kosten verbunden 	
Studie / Quelle	Geäußerte Anforderungen
<p>Kim, S., Seong, H., Her, Y., Chun, J. (2019): A study of the development and improvement of fashion products using a FDM type 3D printer. Fashion and Textiles, 6(9), 1-24.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Allgemeines Problem von 3D-gedruckten Textilien: Kleidung ist schwerer als normale Stoffe, was das Tragen über längere Zeit erschwert → teilweise Änderung des Designs erforderlich, um das Gewicht der Kleidung zu berücksichtigen ▪ Es sollte Material entwickelt werden, das ausreichend flexibel ist, um Kurven und Bewegungen des menschlichen Körpers auszudrücken und das ausreichende Hygroskopizität und Atmungsaktivität aufweist, um angenehme Empfindungen durch die Kleidung zu vermitteln ▪ 3D-Druck-Technologie wird in Modeindustrie mehr Einzug halten, wenn Material entwickelt wird, das sich leicht vom Träger ablösen lässt und die Düsen, durch die es extrudiert wird, nicht verstopft
<p>Sun, D., Valtas, A. (2016): 3D printing for garments production: An exploratory study. Journal of Fashion Technology and Textile Engineering, 4(3), 1000139.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Haupteinschränkungen für den 3D-Druck von Kleidung sind fehlende kommerziell verfügbare Materialien → Aufgrund der Anforderungen an Drapierbarkeit, Dehnbarkeit und Bequemlichkeit eines Kleidungsstücks muss das für den 3D-Druck verwendete Filamentmaterial flexibel und saugfähig sein → Filamente für den 3D-Druck sind jedoch aktuell von diesen Eigenschaftsanforderungen entfernt ▪ 3D-gedruckte Kleidungsstücke sind wasserabweisend - sie können nicht wie bspw. Baumwolle und Seide behandelt werden → Textilien aus 3D-gedruckten Filamenten können nicht in der Waschmaschine gewaschen oder gebügelt werden ▪ Sie sind nicht saugfähig und können nicht genäht werden ▪ Für die Herstellung von 3D-gedruckten Kleidungsstücken besteht Bedarf an Entwicklung neuer Filamente, um Eigenschaftsanforderungen an Textilien zu erfüllen ▪ Der Zugang zur 3D-Druck-Technologie ist nach wie vor mit hohen Investitionskosten und Zeitaufwand bei der Herstellung der 3D-Elemente verbunden → Kosten werden letztendlich über das Endprodukt an den Kunden weitergegeben

Anhang B: Ökobilanzielle Bewertung

Das Ökobilanzscreening wurde von der Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi) der Universität Stuttgart erstellt. Die Ökobilanz-Modelle wurden in der GaBi Software erstellt. Die verwendete Datenbank ist auf aktuellem Stand (Service Pack 40, 2021). Die Ergebnisse zeigen den allgemeinen Umweltfußabdruck (EF) und den Beitrag zum Klimawandel (CO₂-Fußabdruck) nach der EF 3.0 Methode.

Glossar

Deutsch	English	Erklärung
Ökobilanz	Life Cycle Assessment (LCA)	Systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten während des gesamten Lebensweges.
Umweltfußabdruck	Environmental Footprint (EF)	Der EF ist eine auf der Ökobilanz basierende Methode zur Quantifizierung der relevanten Umweltauswirkungen von Produkten (Waren oder Dienstleistungen). Dabei werden verschiedene Umweltwirkungskategorien gewichtet, zusammengeführt und nach einem globalen Budgetansatz normalisiert.
CO₂-Fußabdruck	Carbon Footprint	Systematische Analyse treibhausgasrelevanter Emissionen entlang des Produktlebenszyklus.
Treibhausgasemissionen	Greenhouse gas emissions (GHG)	Die Emission von treibhausrelevanten Gasen. Neben Kohlenstoffdioxid (CO ₂) fallen hierunter auch unter anderem Methan, Distickstoffmonoxid, Fluorkohlenwasserstoffe sowie Schwefelhexafluorid und Stickstofftrifluorid.
Klimawandel	Climate Change	Durch menschliche Aktivitäten verursachte Änderung des Klimas.
GaBi Software	GaBi Software	GaBi ist eine Nachhaltigkeitssoftware für die Ökobilanzierung von Produkten.

Ergebnisse des EF für das Beispielprodukt Göffel

Kurzbeschreibung	Szenario	Material	Umweltfußabdruck (EF 3.0)			
			Rohstoffverbrauch	Herstellungsprozess	Nutzung (Transport)	Lebensende
Göffel aus Primärkunststoff mit Spritzgussverfahren	1	PP	1,35E-04	4,10E-05	5,68E-07	1,36E-05
	2	PS	1,74E-04	4,95E-05	6,31E-07	1,36E-05
Göffel aus Recycling-Filament im 3D-Druck	3	R-PP	0	1,32E-04	-	6,60E-06
	4	R-PS	0	1,44E-04	-	7,34E-06
		HIPS	3,89E-05			

Ergebnisse des CO₂-Fußabdrucks für das Beispielprodukt Göffel

Kurzbeschreibung	Szenario	Material	CO ₂ -Fußabdruck (EF 3.0 Klimawandel) [kg CO ₂ -Äq.]			
			Rohstoff- verbrauch	Herstellungs- prozess	Nutzung (Transport)	Lebens- ende
Göffel aus Primär- kunststoff mit Spritz- gussverfahren	1	PP	0,0132	0,0038	0,0001	0,0331
	2	PS	0,0197	0,0046	0,0001	0,0332
Göffel aus Recycling- Filament im 3D-Druck	3	R-PP	0	0,0163	-	0,0160
	4	R-PS	0	0,0180	-	0,0178
		HIPS	0,0042			

Ergebnisse des EF für das Beispielprodukt Rucksackschnalle

Kurzbeschreibung	Szenario	Umweltfußabdruck (EF 3.0)		
		Nutzung bzw. Herstellungsphase	Lebensende	Gesamt
Wiederverwenden	1	-	6,60E-06	6,60163E-06
Reparieren mit R-PP Schnalle aus Recycling-Filament im 3D-Druck	2	0,000349563	-	0,000349563
Neu kaufen	3	-	6,60E-06	0,21131811

Ergebnisse des CO₂-Fußabdrucks für das Beispielprodukt Rucksackschnalle

Kurzbeschreibung	Szenario	CO ₂ -Fußabdruck (EF 3.0 Klimawandel) [kg CO ₂ -Äq.]		
		Nutzung bzw. Herstellungsphase	Lebensende	Gesamt
Wiederverwenden	1	-	0,0011	0,0011
Reparieren mit R-PP Schnalle aus Recycling-Filament im 3D-Druck	2	0,0401	-	0,0401
Neu kaufen	3	-	0,0011	30,4516

Literaturverzeichnis

- Albrecht, W., Schwitalla, C. (2015): Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS. Fraunhofer IRB Verlag. Online: <https://www.irbnet.de/daten/rswb/15029008835.pdf>, Abruf am 23.08.2020.
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., Baeyens, J. (2009): Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste management*, 29(10), 2625-2643.
- Avérous, L., Pollet, E. (2012): Biodegradable polymers. *Environmental silicate nanobiocomposites*, 13-39. London.
- Baum, H., Pehnelt, G. (2017): The Economics of Recycling revisited: Less might be more. Factbook, CEC (Circular Economy Coalition) for Europe. Wien.
- Bingham, G. A., Hague, R. J., Tuck, C. J., Long, A. C., Crookston, J. J., Sherburn, M. N. (2007): Rapid manufactured textiles. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20(1), 96-105.
- Biomer (2021): Materialeigenschaften. Online: <http://www.biomer.de/P226D.html>, Abruf am 17.01.2021.
- Brandl, H., Gross, R. A., Lenz, R. W., Fuller, R. C. (1990): Plastics from bacteria and for bacteria: poly (β -hydroxyalkanoates) as natural, biocompatible, and biodegradable polyesters. *Microbial Bioproducts*, 77-93. Berlin, Heidelberg.
- BMU (2019): Das BMU klärt auf zum Thema Plastikrecycling. Online: <https://www.bmu.de/meldung/das-bmu-klart-auf-zum-thema-plastikrecycling/>, Abruf am 25.08.2020.
- BTE, IFH Köln, KPMG (2015): KPMG Fashion 2025: Studie zur Zukunft des Fashion-Markts in Deutschland. Bundesverband des deutschen Textileinzelhandels e. V., IFH Institut Für Handelsforschung GmbH und KPMG AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft.
- BVSE (2018): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft - Einblicke und Aussichten. Online: https://www.bvse.de/images/pdf/Nachrichten_2018/Statusbericht_2018_Ansicht_und_Druck.pdf, Abruf am 23.08.2020.
- Caniato, F., Caridi, M., Crippa, L., Moretto, A. (2012): Environmental sustainability in fashion supply chains: An exploratory case based research. *International Journal of Production Economics*, 135(2), 659-670.
- Carbon (2020): Digital Light Synthesis™. Online: <https://www.carbon3d.com/3d-printer-models-carbon/our-technology/>, Abruf am 29.12.2020.
- Cooper, D. (2017): How Electroloom's clothes-printing revolution died. Engadget. Online: <https://www.engadget.com/2017-09-14-electroloom-clothes-printing-startup-death-aaron-rowley.html>, Abruf am 29.12.2020.

- Craighill, A. L., Powell, J. C. (1996): Lifecycle assessment and economic evaluation of recycling: a case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 17, 75–96.
- CSR-RUG (2017): Gesetz zur Stärkung der nichtfinanziellen Berichterstattung der Unternehmen in ihren Lage- und Konzernlageberichten.
- Danit Peleg (2020): About us. Online: <https://danitpeleg.com/about>, Abruf am 28.12.2020.
- Danit Peleg (2021): The Process: How I 3D printed a 5 piece fashion collection at home. Online: <https://danitpeleg.com/the-process/>, Abruf am 12.01.2021.
- de Brito, M. P., Carbone, V., Blanquart, C. M. (2008): Towards a sustainable fashion retail supply chain in Europe: Organisation and performance. *International Journal of Production Economics*, 114(2), 534–553.
- DGAW (2015): Position der DGAW zur Reform der Entsorgung von wertstoffhaltigen Abfällen in Deutschland. Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V. Berlin.
- Dill, S. (2020): Verarbeitung und Charakterisierung von Polyamid 6-Polyhydroxybutyrat-Blends. Universitätsverlag der TU Berlin. Schriftenreihe Kunststoff-Forschung, 86.
- DIN EN ISO 14040:2009-11 (2009): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Berlin.
- DIN EN ISO 14044:2018-05 (2018): Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, Berlin.
- Ellen MacArthur Foundation (2017): A new textiles economy: Redesigning fashion’s future. Online: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/a-new-textiles-economy-redesigning-fashions-future>, Abruf am 23.08.2020.
- Ellen MacArthur Foundation. UN Environment Programme (2019): The new plastics economy global commitment – 2019 progress report. Online: <https://www.newplasticseconomy.org/assets/doc/Global-Commitment-2019-Progress-Report.pdf>, Abruf am 17.01.2021.
- Ellen MacArthur Foundation (2020): Upstream Innovation. A guide to packaging solutions. Online verfügbar unter <https://emf.thirdlight.com/link/agyt3es34kly-k2qe8a/@/preview/1?o>, Abruf am 16.12.2020.
- Essop, A. (2019): New Balance and Formlabs reveal Triplecell sneaker with upgraded 3D printed forefoot. 3D Printing Industry. Online: <https://3dprintingindustry.com/news/new-balance-and-formlabs-reveal-triplecell-sneaker-with-upgraded-3d-printed-forefoot-162012/>, Abruf am 29.12.2020.
- Ethical Filament (2020): Introduction. Online: <http://ef.techfortrade.org>, Abruf am 29.12.2020.

- European Commission (2012): Product Environmental Footprint (PEF) Guide. Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. H08 Sustainability Assessment Unit. Ref. Ares (2012)873782 - 17/07/201. Ispra, Italy.
- European Commission (2018a): Implementation of the Circular Economy Action Plan. Online: http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm, Abruf am 23.08.2020.
- European Commission (2018b): Product Environmental Footprint Category Rules. PEFCR Guidance document, - Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs), version 6.3, December 14 2017. Online: https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6.3.pdf, Abruf am 23.03.2021.
- Finkbeiner, M., Bach, V., Lehmann, A. (2019): Environmental Footprint: Der Umwelt-Fußabdruck von Produkten und Dienstleistungen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau.
- Formlabs (2020): Leading the Future of Performance Products With Customized Manufacturing. Online: <https://formlabs.com/customer-stories/newbalance/>, Abruf am 29.12.2020.
- Formlabs (2021): Rebound Resin: A Production-Ready Elastic 3D Printing Material. Online: <https://formlabs.com/materials/rebound/>, Abruf am 12.01.2021.
- Frommeyer, B., von Gehlen, K., Koch, J., Schmiemann, L., Schewe, G. (2019): Kunststoffverpackungen in der textilen Lieferkette. Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Forschungsstelle für Allgemeine und Textile Marktwirtschaft (Ed.), Forschungsbericht. Münster.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., Jan, E. (2017): The Circular Economy - A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- Gesamtverband textil+mode (2017): Mit jeder Faser intelligent – Die deutsche Textil- und Modeindustrie in Zahlen. Online: https://www.verband-textil-bekleidung.de/fileadmin/Daten/Rundschreiben-Wirtschaft/RS-2017-Wirtschaftspolitik/zahlen2017_web.pdf, Abruf am 17.01.2021.
- Goehrke, S. A. (2018): 3DS' New Fabricate Application: 4 Steps to Wearable Fashion Right Off a Cube 3D Printer. 3D Print. Online: <https://3dprint.com/94618/3ds-cubify-fabricate/>, Abruf am 29.12.2020.
- Goworek, H. (2011): Social and environmental sustainability in the clothing industry: a case study of a fair trade retailer. *Social Responsibility Journal*, 7(1), 74–86.
- Grain, E. (2016): 3D Printing Fashion With Recycled Polyester: A Sustainable Journey. IFFTI - BIFT 2016 International Conference.

- Grappi, S., Romani, S., Barbarossa, C. (2017): Fashion without pollution: How consumers evaluate brands after an NGO campaign aimed at reducing toxic chemicals in the fashion industry. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1164-1173.
- Han, Y., Kim, J. (2018): A Study on the Mechanical Properties of Knit Fabric Using 3D Printing Focused on PLA, TPU Filament. *Journal of Fashion Business*, 22(4), 93-105.
- Heinrich-Böll-Stiftung, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (2019): Plastikatlas – Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff. Online: https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/chemie_plastikatlas_2019.pdf, Abruf am 25.08.2020.
- Humml, S. (2018): Plastikabfall – So verändert China die weltweiten Müllströme. *Spiegel*. Online: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/plastik-muell-china-leitet-weltweite-abfallstroeme-um-a-1214074.html>, Abruf am 23.08.2020.
- Iacovidou, E., Velis, C. A., Purnell, P., Zwirner, O., Brown, A., Hahladakis, J., Millward-Hopkins, J., Williams, P. T. (2017): Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 166, 910–938.
- Jambeck, J. R., Geyer R., Wilcox, C., Siegler, T. R, Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K. L. (2015): Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771.
- Julia Davi (2020): Turning Innovation Into Legacy. Online: <https://juliadaviy.com/about-3d-printers/>, Abruf am 28.12.2020.
- Kaßmann, M. (2014): Grundlagen der Verpackung: Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung, 2. Auflage. Berlin
- Kim, H. (2018): Market analysis and the future of sustainable design using 3D printing technology. *Archives of Design Research*, 31(1), 23-35.
- Kim, S., Seong, H., Her, Y., Chun, J. (2019): A study of the development and improvement of fashion products using a FDM type 3D printer. *Fashion and Textiles*, 6(9), 1-24.
- Korhonen, J., Nuur, C., Feldmann, A., Eshetu Birkie, S. (2018): Circular economy as an essentially contested concept. *Journal of Cleaner Production*, 175, 544–552.
- Koslow, T. (2016): Adidas to Release Sneakers Created from Recycled Ocean Waste This Month. 3D Print. Online: <https://3dprint.com/154713/adidas-recycled-ocean-waste/>, Abruf am 29.12.2020.
- KrWG (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen vom 01. Juni 2012.

- Lazarevic, D., Aoustin, E., Buclet, N., Brandt, N. (2010): Plastic waste management in the context of a European recycling society: Comparing results and uncertainties in a life cycle perspective. *Resources, Conservation und Recycling*, 55(2), 246–259.
- Lee, S. H. (2015): Morphology and Properties of Textiles Manufactured by Three-Dimensional Printing Based on Fused Deposition Modeling. *Textile Science and Engineering*, 52(4), 272–279.
- Li, Y., Zhao, X., Shi, D., Li, X. (2014): Governance of sustainable supply chains in the fast fashion industry. *European Management Journal*, 32(5), 823–836.
- Lindner, C., Hoffmann, O. (2015): Analyse/Beschreibung der derzeitigen Situation der stofflichen und energetischen Verwertung von Kunststoffabfällen in Deutschland. Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH. Online: <https://www.itad.de/information/studien/ITADConsulticKunststoffstudieApril2015.pdf>, Abruf am 23.08.2020.
- Lord, B. (2018): Reebok's 3D printed shoe line dashes into production. 3D Printing Industry. Online: <https://3dprintingindustry.com/news/reeboks-3d-printed-shoe-line-dashes-into-production-137497/>, Abruf am 29.12.2020.
- Lorek, S., Spangenberg, J. H. (2014): Sustainable consumption within a sustainable economy—beyond green growth and green economies. *Journal of cleaner production*, 63, 33–44.
- Materialise (2013): Iris van Herpen Debuts Wearable 3D Printed Pieces at Paris Fashion Week. Online: <https://www.materialise.com/en/cases/iris-van-herpen-debuts-wearable-3d-printed-pieces-at-paris-fashion-week>, Abruf am 30.12.2020.
- Michaeli, W., Greif, H., Wolters, L., Vossebürger, F.-J. (2008): *Technologie der Kunststoffe. Lern- und Arbeitsbuch für die Aus- und Weiterbildung*. München: Carl Hanser Verlag.
- Ministry of Supply (2020): 3D-Print-Knit. Online: <https://www.ministryofsupply.com/technologies/3d-print-knit>, Abruf am 29.12.2020.
- Modeclix (2020): About | Modeclix: The Modular Textile. Online: https://www.modeclix.com/?page_id=2, Abruf am 29.12.2020.
- Mwanza, B. G., Mbohwa, C. (2017): Drivers to Sustainable Plastic Solid Waste Recycling: A Review. *Procedia Manufacturing*, 8, 649–656.
- NaturePlast (2021): PHAs – General Properties. Online: <https://vvk-biokunststoffe.de/wp-content/uploads/2016/06/PHA.pdf>, Abruf am 17.01.2021.
- Pasricha, A., Greeninger, R. (2018): Exploration of 3D printing to create zero-waste sustainable fashion notions and jewelry. *Fashion and Textiles*, 5(1), 1-18.
- Pei, E., Shen, J., Watling, J. (2015): Direct 3D printing of polymers onto textiles: experimental studies and applications. *Rapid Prototyping Journal*, 21(5), 556-571.

- Peng, T., Sun, W. (2017). Energy Modelling for FDM 3D Printing from a Life Cycle Perspective. *International Journal of Manufacturing Research*, 12(1), 83-98.
- Pinto da Costa, J., Rocha-Santos, T., Duarte, A. C. (2020): The environmental impacts of plastics and micro-plastics use, waste and pollution: EU and national measures. Online: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2020/658279/IPOL_STU\(2020\)658279_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2020/658279/IPOL_STU(2020)658279_EN.pdf), Abruf am 03.02.2021
- PlasticsEurope (2018): *Plastics - the Facts 2017*. PlasticsEurope und EPRO (European Association of Plastics Recycling and Recovery Organisations). Online: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/274-plastics-facts-2017>, Abruf am 23.08.2020.
- PWC (2018): *Verpackungen im Fokus - Die Rolle von Circular Economy auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit*. Online: <https://www.pwc.de/de/handel-und-konsumguter/pwc-studie-verpackungen-im-fokus-februar-2018-final.pdf>, Abruf am 25.08.2020.
- Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K. (2017): Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58.
- Refil (2021): About. Online: <https://www.re-filament.com/about/>, Abruf am 13.01.2021.
- Rothgang, M., Dehio, J., Janßen-Timmen, R. (2017): *Ökonomische Perspektiven des Kunststoff-Recyclings: Die Rolle des dualen Systems*. RWI Positionen, Nr. 118, 1–168.
- Salonitis, K., Al Zarban, S. (2015): Redesign optimization for manufacturing using additive layer techniques. *Procedia CIRP*, 36, 193–198.
- Santhanam, A., & Sasidharan, S. (2010): Microbial production of polyhydroxy alkanotes (PHA) from *Alcaligenes* spp. and *Pseudomonas oleovorans* using different carbon sources. *African Journal of Biotechnology*, 9(21), 3144–3150.
- Seuring, S., Müller, M. (2008): From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699–1710.
- Sirch, E. M. (2016): *3D-Druck: The Future of Fashion*. zukunftsInstitut. Online <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/3d-druck-the-future-of-fashion/>, Abruf am 28.12.2020.
- sphera (2021): *Environmental Footprint (EF)/ILCD recommendation*. GaBi Solutions. Online: <http://www.gabi-software.com/deutsch/my-gabi/gabi-documentation/gabi-lcia-dokumentation/environmental-footprint-efilcd-recommendation/>, Abruf am 19.03.2021.
- Spiewak, A. (2017): *3D drawing disrupts shoe production with more efficiency - Reebok and BASF collaborate on latest innovation that is changing footwear creation*. BASF. Online <https://www.basf.com/us/en/media/featured-articles/Technology/Reebok-Liquid-Speed.html>, Abruf am 29.12.2020.

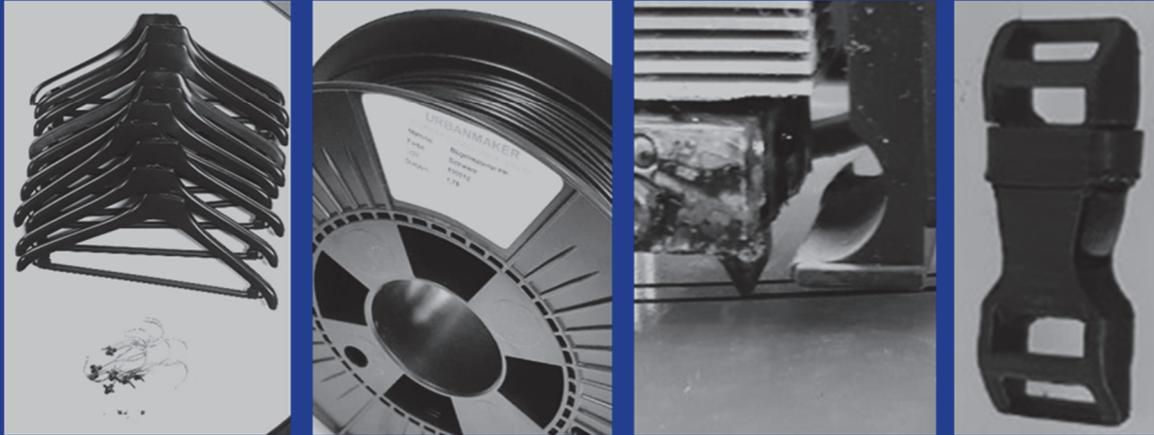
- Stevenson, K. (2019): No Really, It's The End Of The Line For Cubify. Fabbaloo. Online: <https://www.fabbaloo.com/blog/2019/10/20/no-really-its-the-end-of-the-line-for-cubify>, Abruf am 29.12.2020.
- Stiftung Zentrale Stelle (2019a): Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG. Online: https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Mindeststandard/Mindeststandard_VerpackG_2019.pdf, Abruf am 25.08.2020.
- Stiftung Zentrale Stelle (2019b): Positive Bilanz nach 10 Monaten Verpackungsregister – Verpackungsgesetz entfaltet beabsichtigte Wirkungen. Verpackungsregister. Online: <https://www.verpackungsregister.org/information-orientierung/neuigkeiten-presse/aktuelles/detail-ansicht-newseintraege/news/positive-bilanz-nach-10-monaten-verpackungsregister-verpackungsgesetz-entfaltet-beabsichtigte-wirkungen>, Abruf am 23.08.2020.
- Stiftung Zentrale Stelle (2020): Hersteller in der Verantwortung – Ohne Einsatz von Rezyklaten sind Recyclingquoten nicht erfüllbar. Online: <https://www.verpackungsregister.org/information-orientierung/neuigkeiten-presse/aktuelles/detail-ansicht-newseintraege/news/hersteller-in-der-verantwortung-ohne-einsatz-von-rezyklaten-sind-recyclingquoten-nicht-erfuellbar-1>, Abruf am 25.08.2020.
- Sun, D., Valtas, A. (2016): 3D printing for garments production: An exploratory study. *Journal of Fashion Technology and Textile Engineering*, 4(3), 1000139.
- Süddeutsche Zeitung (2019): Neues Verpackungsgesetz: 2000 Unternehmen drohen Bußgelder. Online: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/abfall-neues-verpackungsgesetz-2000-unternehmen-drohen-bussgelder-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-190626-99-801910>, Abruf am 23.08.2020.
- Tamicare (2020): Introducing COSYFLEX® - The only additive manufacturing technology for textiles. Online: <https://www.tamicare.com>, Abruf am 29.12.2020.
- Tamicare (2021): Technology. Online: <https://www.tamicare.com/manufacture>, Abruf am 12.01.2021.
- Thompson, R. C., Moore, C. J., Vom Saal, F. S., Swan S. H. (2009): Plastics, the environment and human health: current consens and future trends. *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Science*, 364(1526), 2153–2166.
- Thum, M. (2018): Zukunft liegt im 3D-Druck: Adidas installiert 50 3D-Drucker von Carbon und plant 100.000 Schuhe mit 3D-Sohlen bis Jahresende. *3D-grenzenlos Magazin*. Online: <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/kurznachrichten/adidas-carbon-3d-druck-ansbach-27343873/>, Abruf am 29.12.2020.
- Tieke, B. (2014): *Makromolekulare Chemie – Eine Einführung*, 3. Auflage. Weinheim.

- Umweltbundesamt (2016a): Position: Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/170601_uba_pos_kunststoffrecycling_dt_bf.pdf, Abruf am 17.01.2021.
- Umweltbundesamt (2016b): Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen – mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_65_2016_steigerung_einsatz_sekundaerrohstoffe.pdf, Abruf am 17.01.2021.
- Umweltbundesamt (2019a): Abfallrecht. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/abfallrecht>, Abruf am 23.08.2020.
- Umweltbundesamt (2019b): Kunststoffe. Hinweise zum Recycling. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/kunststoffe#hinweise-zum-recycling>, Abruf am 19.03.2021.
- Umweltbundesamt (2021): Kunststoffabfälle. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#kunststoffe-produktion-verwendung-und-verwertung>, Abruf am 17.01.2021.
- VerpackG (2017): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen vom 5. Juli 2017.
- VerpackV (1991): Verordnung über die Vermeidung von Verpackungsabfällen vom 12. Juni 1991.
- Vettese Forster, S. (2017): 3D Printable Recycled Textiles: Material Innovation and a Resurrection of the Forgotten “shoddy” Industry. *Journal of Textile and Design Research and Practice*, 5(2), 138–156.
- Von Pentz, L. (2017): Nachhaltigkeit aus dem 3D-Drucker (Teil 2). CleanEnergy Project. Online: <https://www.cleanenergy-project.de/umwelt/ressourcenmanagement/nachhaltigkeit-aus-dem-3d-drucker-teil-2/>, Abruf am 29.12.2020.
- Wang, S., Daelemans, L., Fiorio, R., Gou, M., D’hooge, D. R., De Clerck, K., Cardon, L. (2019): Improving mechanical properties for extrusion-based additive manufacturing of poly (lactic acid) by annealing and blending with poly (3-Hydroxybutyrate). *Polymers*, 11(19), 1529.
- Wang, S., De Clerck K., Cardon, L. (2018): Polylactic acid/poly-3-hydroxybutyrate applications in Extrusion based Additive Manufacturing. International Conference on Polymers and Moulds Innovations-PMI 2018. Institute of Polymers and Composites, University of Minho, Portugal.
- Zampori, L., Pant, R. (2019): Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method. Joint Research Centre, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Zierer, M. (2020): NIKE FLYPRINT: Ein Upper aus dem 3D-Drucker. Keller Sports. Online: <https://www.keller-sports.de/guide/nike-flyprint/>, Abruf am 29.12.2020.

3Dnatives (2019): Designer Julia Daviy on disrupting and bringing sustainability to the fashion industry. Online: <https://www.3dnatives.com/en/julia-daviy-280520194/>, Abruf am 29.12.2020.

3Druck (2018): Nike erweitert Sortiment 3D-gedruckter Schuhe. Online: <https://3druck.com/case-studies/nike-erweitert-sortiment-3d-gedruckter-schuhe-2777100/>, Abruf am 29.12.2020.



Westfälische Wilhelms-Universität Münster

**FATM – Forschungsstelle für
Allgemeine und Textile Marktwirtschaft**

Universitätsstraße 14 - 16
48143 Münster

Tel.: 0251 83-22831

Fax: 0251 83-22836

E-Mail:

fatm@wiwi.uni-muenster.de