

Abschlussbericht- Teil II (umfassender Bericht)

Bündnis: WIR! W2Value

Verbundprojekt:

**WIR! Biobasierte kreislauforientierte Wiederinwertsetzung von EVA-
Abfällen für Orthopädieschuheinlagen-WEVA-ORTH**

Teilprojekt Nr.03WIR4507B

**Logistische und verfahrenstechnische Behandlung von
Altschaumstoffen sowie Herstellung von Platten und
prototypischen Einlagen**

1.

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen:	03WIR4507B
Projektlaufzeit:	01.07.2023 bis 30.06.2025

1.Marktrecherche:

Zielsetzung der Marktrecherche

Im Rahmen dieser Marktrecherche wurde der Markt für EVA-Produkte zunächst umfassend analysiert und beschrieben. Im Fokus stand dabei insbesondere die Identifikation von Marktpotenzialen für das Produkt WEVA-ORTH. Ziel war es, Chancen und Risiken im Hinblick auf bestehende Rahmenbedingungen und relevante Einflussfaktoren transparent zu machen und daraus konkrete Maßnahmen zur erfolgreichen Markterschließung abzuleiten.

Das übergeordnete Ziel der Marktrecherche sowie der Entwicklung von WEVA-ORTH bestand darin, die Kreislauffähigkeit von Materialien im orthopädischen Bereich zu maximieren. Es sollte sichergestellt werden, dass eingesetzte Werkstoffe nicht nur eine hohe Funktionalität bieten, sondern auch recycelt und wiederverwendet werden können, um so den Ressourcenverbrauch zu minimieren und den CO₂-Fußabdruck signifikant zu verringern.

Im Fokus unserer Forschungs- und Entwicklungsbemühungen stand die Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und die Entwicklung nachhaltiger, leistungsstarker und gleichzeitig kosteneffizienter Lösungen für den orthopädischen Markt. Dabei wurde besonderer Wert auf die Praktikabilität und Marktfähigkeit der entwickelten Produkte gelegt, um sowohl ökologische als auch ökonomische Anforderungen gleichermaßen zu erfüllen.

Die Marktanalyse wurde auf der Basis eines projektspezifisch entwickelte Stichwortkataloges erstellt, die sich in folgende Teilbereiche untergliedert und mit nachfolgenden projektragenden Erkenntnissen zusammengefasst wurde:

EVA in der Schuhindustrie

EVA (Ethylen-Vinyl-Acetat) ist ein thermoplastischer Kunststoff, der in der Schuhindustrie aufgrund seiner vielseitigen und positiven Eigenschaften weit verbreitet eingesetzt wird. Das Material besteht aus einer Kombination von Ethylen und Vinylacetat, wobei der Anteil an Vinylacetat je nach Anwendung meist zwischen 10 % und 50 % variiert. Je höher der Vinylacetatanteil ist, desto weicher und flexibler wird das Material. EVA ist besonders wegen seiner geschlossenzelligen, meist vernetzten Struktur, seiner Flexibilität, seiner hohen Dämpfungseigenschaften sowie seiner Witterungs- und Chemikalienbeständigkeit unter anderem interessant für die Herstellung von Schuhsohlen, Einlagen, Riemen, Schalenmaterial in Ski- und Wassersportschuhen [1].

Ab einem Vinylacetatanteil von unter 18 % spricht man von einem EVA mit hoher Dichte, das sehr hart, formstabil und nur wenig flexibel ist. Dieses EVA findet vor allem in industriellen Bereichen Anwendung, da es eine hohe Zugfestigkeit sowie eine geringe Verformungsneigung aufweist [2]. Ein EVA mit etwa 18 % Vinylacetat und darüber bietet eine ausgewogene Kombination aus Flexibilität, Haltbarkeit und Wirtschaftlichkeit und gilt als besonders geeignet für den Einsatz in der Schuhfertigung. Bei einem Anteil von 24 % bis 28 % ist EVA deutlich weicher, elastischer und dehnbarer, was es beispielsweise für Schuheinlagen, Verpackungen oder medizinische Anwendungen attraktiv macht. Liegt der Anteil über 28 %, wird das Material extrem weich, hochflexibel und eignet sich unter anderem für Kabelummüllungen oder hitzeversiegelbare Produkte [1].

EVA-Produkte gibt es in vernetzter und unvernetzter Form. Unvernetztes EVA ist flexibel und gut formbar, aber weniger robust. Vernetztes EVA ist stärker, widerstandsfähiger und besser geeignet für langlebigere Anwendungen, jedoch schwieriger zu recyceln. Vernetztes EVA besitzt zahlreiche weitere Vorteile, die es im Schuhbereich besonders wertvoll machen. Es ist wasserdicht, nicht saugfähig, sehr leicht und dennoch mechanisch belastbar. Zudem weist es eine hohe Zähigkeit, gute Rückstelleigenschaften sowie eine hohe Stoß- und UV-Beständigkeit auf [3]. Das Material enthält keine Weichmacher, ist meist lebensmittelecht, hautverträglich und bleibt über einen langen Zeitraum weich, ohne spröde zu werden [2].

Darüber hinaus ermöglicht es die einfache Bearbeitung des Materials, etwa durch Schneiden, Kleben, Fräsen, Prägen, Tiefziehen oder Laminieren. Diese vielseitigen Verarbeitungseigenschaften machen EVA besonders attraktiv für die orthopädische Schuhtechnik, da es sich individuell anpassen lässt. Zudem kann es gezielt mit Zusatzstoffen wie Ruß oder Gummi modifiziert werden, um beispielsweise die Leitfähigkeit bei Sicherheitsschuhen zu verbessern oder die Dämpfungseigenschaften zu optimieren [4].

EVA zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität in der Herstellung aus. In unvernetzter Form lässt sich das Material sowohl im Spritzgussverfahren bei Temperaturen zwischen 175 °C und 220 °C als auch durch Extrusion bei 140 °C bis 180 °C bearbeiten. Die vernetzte Form wird üblicherweise in Pellets oder Platten verarbeitet [5].

Ein Nachteil bei der Verwendung hochvernetzter EVA-Materialien in unseren Anwendungen besteht in der problematischen Wiederverwertung dieser Materialien. Nach umfangreicher Recherche lassen sich jedoch Ansätze identifizieren, um dieser Herausforderung zu begegnen. So kann der Einsatz von Antioxidationsmitteln, die Reduktion der Partikelgröße sowie die Verwendung von sogenannten

Compatibilizern, also Polymermischungen, die die Recyclingfähigkeit des Materials verbessern, als Lösungsansätze dienen [6]. Ein entsprechendes Patent wurde beispielsweise von Nike eingereicht, um die Rezyklierbarkeit von EVA-Materialien zu optimieren [7]. Anzumerken ist, dass alle Unternehmen, die sich mit dem Recycling von EVA befassen, dies fast ausschließlich unter Verwendung eigener Produktionsabfälle durchführen. Die Verarbeitung von externen EVA-haltigen Compounds, wie sie in unserem Anwendungsfall vorliegt, findet bislang keine Anwendung. Darüber hinaus wird das recycelte, zerkleinerte EVA-Material in der Regel lediglich in geringen Mengen als Füllstoff eingesetzt [7,8].

EVA und weitere Kunststoffe-in Zahlen – Fakten und Statistiken

Die Herstellung und Entsorgung von Kunststoffen stellt weltweit eine große Herausforderung dar, wobei insbesondere die Textil- und Schuhindustrie eine zentrale Rolle spielt. Mit jährlich rund 120 Milliarden produzierten Kleidungsstücken und 20 Milliarden Paar Schuhen wird ein erheblicher Teil dieser Waren – etwa ein Drittel – nie verkauft oder genutzt, was zu enormen Abfallmengen führt. Die Branche verursacht rund 2,1 Milliarden Tonnen Abfall pro Jahr und trägt mit etwa 10 % maßgeblich zu den globalen CO₂-Emissionen bei [9]. Auch in Deutschland ist der Konsum hoch: Pro Jahr werden etwa 2 Millionen Tonnen Textilien verkauft und rund 1,5 Millionen Tonnen entsorgt, was etwa 28 Kilogramm pro Kopf entspricht [10].

Ethylvinylacetat (EVA) ist in dieser Industrie weit verbreitet und besonders für die Schuhproduktion von großer Bedeutung. Bereits 2007 betrug die europäische Produktionskapazität von EVA-Copolymeren rund 600.000 Tonnen jährlich, wobei der Großteil auf Produkte mit einem Vinylacetatgehalt unter 18 % entfiel. Hinzu kommen etwa 200.000 Tonnen EVM-Produkte. In Asien, einem der bedeutendsten Produktionsstandorte für Schuhe, liegen die Mengen noch deutlich höher. Weltweit belief sich die Produktionskapazität für EVA im Jahr 2021 auf rund 6,5 Millionen Tonnen. Der steigende Bedarf wird insbesondere durch die wachsenden Märkte in den Bereichen Schuhe, Verpackung und Photovoltaik angetrieben. Prognosen zufolge wird der globale EVA-Verbrauch in den kommenden Jahren mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von etwa 6 % weiter steigen, insbesondere durch die zunehmende Industrialisierung und den steigenden Konsum in Schwellenländern [11,12].

Zu den führenden Herstellern von EVA zählen international tätige Unternehmen, die unter verschiedenen Markennamen wie Greenflex, Levapren, Evatane, Elvax, Ultrathene, Miravithen, Phylon oder Evasky produzieren. Diese Zahlen und Marken verdeutlichen die wirtschaftliche Bedeutung von EVA, zeigen jedoch gleichzeitig die Notwendigkeit nachhaltiger Lösungen – insbesondere im Bereich des Recyclings, der Entwicklung umweltfreundlicher Alternativen und der Reduzierung von Überproduktion – um den ökologischen Herausforderungen der Kunststoffnutzung wirksam zu begegnen [13].

Die globale Schuhproduktion liegt bei rund 20 Milliarden Paar Schuhen pro Jahr – eine gewaltige Menge, die auch eine erhebliche Belastung für Umwelt und Ressourcen bedeutet. Allein Nike verkauft im Sekundentakt etwa 25 Paar Sneaker. Da ein Großteil dieser Schuhe Sohlen und Obermaterialien aus erdölbasierten Kunststoffen wie EVA (Ethylen-Vinyl-Acetat) enthält, ist der damit verbundene Energieverbrauch sowie der Ausstoß von CO₂ und Chemikalien enorm. So verursacht die Herstellung eines konventionellen Sneaker-Paares durchschnittlich etwa 13 Kilogramm CO₂. Nachhaltigere Modelle wie der ECO4 Sneaker von Bleed Clothing reduzieren diesen Wert erheblich – auf unter vier Kilogramm pro Paar [14].

Diese ökologischen Herausforderungen haben zu einem wachsenden Interesse an Recyclingstrategien in der Schuhbranche geführt. Der Fokus liegt darauf, sowohl den Rohstoffverbrauch als auch die Menge an nicht verwertbarem Abfall am Ende des Produktlebens zu reduzieren [15].

Orthopädieschuhtechnik in Zahlen – Marktstruktur und Versorgung

Im Zeitraum von 2014 auf 2015 sank die Zahl der erfassten Orthopädieschuhmacher-Betriebe in Deutschland um 25 auf insgesamt 1.973 Unternehmen. Trotz des leichten Rückgangs bei den Betrieben stieg die Zahl der tätigen Personen in diesem Handwerkszweig deutlich an – auf über 14.400 Beschäftigte. Damit ergibt sich ein Durchschnitt von rund sieben Mitarbeitenden pro Betrieb, wobei etwa 17,7 % der Beschäftigten geringfügig entlohnt sind [16].

Der Branchenumsatz erhöhte sich im gleichen Zeitraum auf insgesamt 939 Millionen Euro, was einem durchschnittlichen Jahresumsatz von rund 476.000 Euro pro Betrieb entspricht. Bemerkenswert ist die Struktur der Betriebe: Knapp die Hälfte der Branche (929 Unternehmen) besteht aus Ein- bis Vier-Mann-Betrieben. Lediglich zehn Unternehmen gehören zur höchsten Umsatzgruppe mit einem Jahresumsatz über fünf Millionen Euro. Diese wenigen Großbetriebe beschäftigen zusammen rund 1.000 Personen [17].

Auch auf der Kostenseite ist ein Wachstum zu beobachten. Die Ausgaben für Hilfsmittel stiegen laut Auswertung öffentlich zugänglicher Quellen in den vergangenen Jahren im Schnitt um etwa 4,3 % pro Jahr. Auf Basis der von der Barmer Ersatzkasse (BEK) im Jahr 2012 gemeldeten Einlagenkosten von rund 50,17 Millionen Euro ergibt sich bei konstanter Steigerung ein prognostizierter Wert von etwa 70 Millionen Euro im Jahr 2021 – allein bei dieser Kasse [18].

Eine exemplarische Hochrechnung, basierend auf Mitgliedszahlen, Versorgungskosten und Bevölkerungsdaten, ergab eine durchschnittliche Abgabemenge von ca. 1.300 Paar Einlagen pro Orthopädiebetrieb mittlerer Größe und Jahr. Diese Zahl verdeutlicht die hohe Relevanz orthopädischer Versorgung im Gesundheitswesen und zeigt zugleich das wirtschaftliche Potenzial für spezialisierte Anbieter [19].

Kunststoffe in der Umwelt – Bioplastik im Vergleich zur Gesamtproduktion

Laut dem Abschlussbericht 198/2020 des Umweltbundesamtes lag die weltweite Kunststoffproduktion im Jahr 2014 bei rund 311 Millionen Tonnen. Im Vergleich dazu war die Menge an Bioplastik mit lediglich 1,7 Millionen Tonnen verschwindend gering. Seither hat sich die Produktion biobasierter Kunststoffe deutlich erhöht: Bereits ab 2016 zeichnete sich ein rascher Anstieg ab [20]. Inzwischen – Stand 2020 – liegt die weltweite Produktionsmenge bei über 4,16 Millionen Tonnen pro Jahr [21].

Ein Großteil dieser biobasierten Kunststoffe – etwa 1,6 Millionen Tonnen bzw. rund 39 % – wird vor allem im Bereich der Verpackungsindustrie eingesetzt, beispielsweise für biologisch abbaubare Lebensmittelfolien [23]. Trotz dieses Wachstums bleibt der Anteil von Bioplastik im Verhältnis zur Gesamtmenge aller produzierten Kunststoffe vergleichsweise gering, was die Bedeutung weiterer Forschung, politischer Anreize und Innovationen in der Materialentwicklung unterstreicht [22].

Der Schuhmarkt im Allgemeinen – Potenzial für recyceltes EVA und Bio-EVA

Im Jahr 2023 erzielte der deutsche Schuhmarkt einen Umsatz von rund 10,01 Milliarden Euro [24]. Bis 2028 wird ein Wachstum auf etwa 11,68 Milliarden Euro erwartet, was einer jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 3,13 % entspricht [24]. Das umsatzstärkste Segment bildeten Lederschuhe mit rund 3 Milliarden Euro [24]. Der durchschnittliche Pro-Kopf-Umsatz lag bei etwa 119,50 Euro, wobei etwa 45 % der Verkäufe über den Onlinehandel stattfanden [24]. Für 2028 wird mit etwa 212 Millionen verkauften Paar Schuhen gerechnet, während der Pro-Kopf-Verbrauch 2023 bei durchschnittlich 2,6 Paar lag [22].

Global belief sich der Umsatz im Schuhmarkt 2023 auf etwa 374,20 Milliarden Euro, mit einem prognostizierten Anstieg auf 457,80 Milliarden Euro bis 2028 [23]. Der weltweite Pro-Kopf-Umsatz lag bei rund 48,72 Euro, wobei die USA mit 83,10 Milliarden Euro den höchsten nationalen Umsatz verzeichneten. Das größte Marktsegment weltweit waren Stoff- und sonstige Schuhe mit einem Volumen von etwa 131,90 Milliarden Euro. Rund 31 % der globalen Umsätze wurden online erzielt, bei einem durchschnittlichen Pro-Kopf-Verbrauch von 1,82 Paar Schuhen [23].

Zunehmend rückt das Thema Nachhaltigkeit in den Fokus der KonsumentInnen. Einer Umfrage aus dem Sommer 2022 zufolge betrachten 34 % der Befragten in der DACH-Region Nachhaltigkeit beim Schuhkauf als wichtig. Für 24 % ist insbesondere die Recyclefähigkeit der Materialien kaufentscheidend. Daraus ergibt sich ein bedeutendes Marktpotenzial für recycelte oder biobasierte Materialien wie recyceltes EVA oder Bio-EVA. Trotz eines hohen Importanteils – vor allem aus China und Vietnam – bleibt Deutschland ein relevanter Markt mit zunehmend umweltbewussten Verbraucherinnen. Insbesondere Anbieter nachhaltiger Produkte, etwa im Bereich orthopädischer oder sicherheitstechnischer Schuhe, profitieren von diesem Wandel. Insgesamt eröffnen sich damit große Chancen für den Einsatz innovativer, umweltfreundlicher Werkstoffe auf dem deutschen wie auch internationalen Schuhmarkt [24].

EVA – Recycling-wie weit ist die Branche?

Die Recyclingquote von EVA (Ethylen-Vinylacetat-Copolymer) in Europa ist derzeit niedrig, jedoch gibt es zunehmend positive Entwicklungen. Unternehmen wie zum Beispiel INTCORECYCLING haben sich auf das Recycling von EVA-Schäumen aus der Schuhindustrie spezialisiert und bieten entsprechende Maschinen und Technologien an (25). Das Loop-Konzept von adidas strebt die vollständige Zirkularität von Schuhen an (26), während das portugiesische Unternehmen Vapesol innovative Recyclingprozesse entwickelt, um eigene Produktionsabfälle, insbesondere EVA, als Füllstoffe oder pulverförmiges Rezyklat wiederzuverwenden (27). Große Marken wie Nike und adidas forschen intensiv an Lösungen für das Recycling von EVA-Abfällen, die bei der Schuhproduktion anfallen oder durch die Rückgabe getragener Schuhe zurückgeführt werden (30). Besonders im asiatischen Raum ist eine hohe Innovationsaktivität zu verzeichnen, etwa mit Patentanmeldungen zur Wiederverwertung von EVA-Schäumen. In Deutschland gibt es bislang keine Patente zum Thema EVA-Schaum-Recycling, und der orthopädische Markt steckt in Bezug auf Recyclingprodukte noch in den Anfängen.

Ein bedeutendes Beispiel für innovative Recyclingtechnologien ist das Projekt des japanischen Kunststoffverarbeiters Sekisui in Zusammenarbeit mit Sumitomo Chemical, das ein chemisches Recycling von EVA und anderen Kunststoffen ermöglicht. Eine Pilotanlage, die 2022 in Betrieb genommen wurde, wandelt Kunststoffabfälle in Ethanol um, das dann als Rohstoff für die Herstellung von Ethylen und Polyethylen dient. Der kommerzielle Betrieb ist ab 2025 geplant [28].

Auf Fachmessen wie der K-Messe wird zunehmend deutlich, dass biobasierte und recycelte Materialien stärker im Fokus stehen, was den branchenweiten Wandel zu nachhaltigeren Lösungen unterstreicht. In der Forschung wird ebenfalls intensiv an neuen Recyclingmethoden gearbeitet, etwa an einem Vitrimere-System der Case Western Reserve University, das es ermöglicht, EVA-Abfälle zu hochleistungsfähigem Material für industrielle Anwendungen weiterzuverarbeiten [29].

„BIO“ EVA- Status und Trends

Im Bereich nachhaltiger EVA-Materialien setzt das Unternehmen Braskem mit seinem Bio-EVA-Granulat einen wichtigen Akzent. Braskem nutzt Ethanol aus Zuckerrohr, das in Brasilien unter minimalem Landflächenverbrauch produziert wird. Dieses Ethanol dient als Basis für die Herstellung von Ethylen und Vinyl, die für die EVA-Produktion benötigt werden [30]. Auch Bloom bietet ein innovatives EVA-Gemisch an, das zu 80 % aus Algen besteht [31]. Reebok setzt mit seiner Cotton & Corn-Initiative ebenfalls auf biobasierte Rohstoffe. In Zusammenarbeit mit DuPont und Tate & Lyle verwendet Reebok für die Schuhsohlen einen 100 % biobasierten Alkohol namens Susterra-Propandiol [32]. Trotz der zunehmenden Nutzung nachwachsender Rohstoffe steht der Einsatz solcher Materialien aufgrund ihrer möglichen Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion kritisch zur Diskussion [33]. Auch Grendene, ein Unternehmen aus Brasilien, engagiert sich sowohl im Recycling als auch in der Nutzung biobasierter Materialien. Grendene hat eine nachhaltige Lösung entwickelt, bei der bis zu 30 % recyceltes Material in Schuhen verwendet wird. Zudem setzt das Unternehmen auch auf Bio-EVA von Braskem. Durch den Einsatz dieses Rohstoffs wird eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 20 % im Vergleich zu fossilen Quellen erzielt [34].

Die Marke Rider verwendet ebenfalls Bio-EVA von Braskem in ihrem Modell Rider R4, während der Rider R35th einen Materialmix aus 35 % recyceltem PVC, 30 % Bio-EVA und 25 % recyceltem PET nutzt [35]. Auch die junge Marke Genesis Footwear hat einen EVA-Schaum entwickelt, der zu 30 % aus Kaffeeresten besteht und als Innensohle verwendet wird. Dieser Schaum soll nicht nur gelenkschonend dämpfen, sondern auch thermoregulierende und feuchtigkeitsableitende Eigenschaften besitzen. Genesis setzt zudem auf Recycling, indem sie ihr EVA mit recyceltem PET aus alten Plastikflaschen kombiniert [36].

Insgesamt zeigen diese kleine Auswahl an Initiativen, dass Unternehmen verstärkt nachhaltige Alternativen im Bereich EVA entwickeln, um ihren ökologischen Fußabdruck zu reduzieren und gleichzeitig innovative Lösungen für die Schuhproduktion zu schaffen. In der Beschaffung wird aber vorwiegend das BIO-EVA von Braskem eingesetzt.

3 D Druck – eine Konkurrenz zur klassischen EVA-Herstellung?

Die Zukunft des Werkstoffs EVA als Plattenware könnte durch den Wettbewerb mit 3D-gedruckten Sohlen beeinflusst werden, insbesondere durch die Entwicklungen im Bereich biobasierter Materialien und die zunehmende Anwendung von additiven Fertigungstechnologien. Xtellar, ein Spezialist für 3D-Druckmaterialien, hat ein biobasiertes EVA-Granulat vorgestellt, das für großformatige 3D-Drucker geeignet ist und eine nachhaltige, flexible Alternative zu herkömmlichen Materialien bietet. Dieses Granulat wird in flexible Filamente umgewandelt, die eine gute Feuchtebeständigkeit und ein geringes Gewicht aufweisen [37].

Parallel dazu arbeitet Covestro an einem recycelbaren TPU für 3D-gedruckte Sohlen und verfolgt ein Programm zur Förderung der Kreislaufwirtschaft. In Zusammenarbeit mit GeBioM und weiteren Partnern der Wertschöpfungskette wird bereits die Rücknahme und das Recycling von gebrauchten

Einlegesohlen erforscht. Diese Entwicklungen tragen dazu bei, dass recycelte Materialien zunehmend in den Fertigungsprozess integriert werden, was die Umweltauswirkungen der Produktion weiter reduziert [38].

Im Vergleich zu herkömmlichen Bearbeitungstechniken wie dem CNC-Fräsen, bei dem Material vom Rohling subtraktiv entfernt wird, bietet der 3D-Druck eine additive Fertigung, bei der Material schichtweise aufgebaut wird. Der 3D-Druck hat den Vorteil einer einfacheren Bedienung und ist in der Regel kostengünstiger für kleinere Auflagen. Allerdings ist er noch nicht für die Massenproduktion geeignet und hat Einschränkungen in Bezug auf Geschwindigkeit und Zugänglichkeit. Zudem ist die Qualität der Oberflächen und die Feinjustierung bei 3D-gedruckten Teilen noch nicht auf dem Niveau von CNC-gefrästen Objekten [39].

Prognose zu EVA-Rezyklaten

In den vergangenen Jahren hat das Thema Nachhaltigkeit bei Materialien branchenübergreifend stark an Relevanz gewonnen – insbesondere in der Automobilindustrie, die traditionell als Innovationsmotor und Seismograf für andere Industrien gilt. Immer mehr OEMs setzen sich ambitionierte Ziele zur Reduktion ihres ökologischen Fußabdrucks durch den verstärkten Einsatz von Rezyklaten. So plant Volvo, bis 2025 in jedem neuen Fahrzeug einen Rezyklatanteil von mindestens 25 % zu integrieren. Renault hat bereits eine Quote von 33 % in Europa gefertigten Fahrzeugen erreicht. BMW und Mercedes-Benz verfolgen vergleichbare Strategien und streben bis 2030 einen durchschnittlichen Sekundärrohstoffanteil von 40 % in ihren Fahrzeugen an.

Diese Entwicklungen wirken sich zunehmend auch auf andere Industriezweige aus – insbesondere auf die Schuhbranche, die in Materialwahl und Produktionsprozessen häufig dem Vorbild der Automobilindustrie folgt. Mit wachsendem gesellschaftlichem und politischem Druck steigt auch hier der Bedarf an nachhaltigen Lösungen, wodurch der Einsatz von Rezyklaten wie recyceltes EVA zunimmt [40,41,42,43].

Gleichzeitig führen die steigende Nachfrage, begrenzte Verfügbarkeiten hochwertiger Rezyklate und regulatorische Anforderungen zu einem strukturellen Wandel am Rohstoffmarkt. Während die Preise für konventionelles EVA starken Schwankungen unterliegen – bedingt durch die Volatilität fossiler Rohstoffe – entwickelt sich der Markt für rEVA zunehmend unabhängig. Kurz- bis mittelfristig ist mit einer leichten Preissteigerung für hochwertig aufbereitetes Rezyklat zu rechnen, insbesondere bei gleichbleibend hoher Nachfrage und begrenzten Recyclingkapazitäten [44]. Langfristig könnte sich jedoch durch technologische Fortschritte und eine Ausweitung der Rezyklat-Infrastruktur eine Stabilisierung der Preise auf einem wettbewerbsfähigen Niveau einstellen.

Für die Schuhindustrie bedeutet dies: Wer frühzeitig in die Entwicklung und Integration von Rezyklaten investiert, kann nicht nur ökologische Vorteile nutzen, sondern sich auch wirtschaftlich zukunftsfähig positionieren [45,46].

Produktionskosten für Ethylvinylacetat (EVA)

Die Produktionskosten für Ethylvinylacetat (EVA) werden maßgeblich durch die Rohmaterialien bestimmt, vor allem Ethylen, das rund 15–20 % der Gesamtkosten ausmacht [47]. Ein wichtiger Preistreiber ist der Vinylacetatgehalt (VA): Produkte mit höherem VA-Anteil (ab ca. 28 %) sind teurer, da sie bessere Eigenschaften für bestimmte Anwendungen bieten [48]. Logistikkosten machen etwa 10–15 % aus und variieren je nach Standort, Verpackung und Nachfrage [49]. Schwankungen bei der Rohstoffversorgung führen zudem zu Preisschwankungen [50]. Fixkosten liegen bei 12–19 % und umfassen Arbeits-, Betriebs- sowie Maschinen- und Infrastrukturkosten, die unabhängig von der

Produktionsmenge anfallen [51]. Hinzu kommen Verarbeitungskosten durch spezielle Verfahren und zusätzliche Lohnnebenkosten [52]. Insgesamt prägen Rohstoffpreise, Logistik und Fixkosten die Kostenstruktur von EVA und ergeben eine komplexe Kostenlandschaft, in der nicht nur die Rohstoffpreise, sondern vor allem auch logistische Rahmenbedingungen sowie die betrieblichen Fixkosten maßgebliche Einflussfaktoren sind. Der Produktionsstandort Deutschland liefert hier somit zumindest logistisch einen entscheidenden Kostenvorteil.

2. Lastenheft

Das erstellte Lastenheft beschreibt die Anforderungen an eine orthopädische Weichschaumeinlage aus EVA (Ethylvinylacetat), die für die Versorgung gängiger Fußfehlstellungen konzipiert wird. Die Einlage besteht aus einem funktionellen Unterbau, der durch verschiedene Oberbauvarianten aus unterschiedlichen Materialien, Stärken und Formen ergänzt werden kann. Ziel der Einlage ist die Stabilisierung des Längsgewölbes, die Korrektur der Stellung des Sprunggelenkkomplexes sowie die Druckumverteilung im Vorfußbereich zur Minimierung von Beschwerden. Zusätzlich soll die Einlage bei Bedarf zur sensomotorischen Variante ausgebaut werden können, beispielsweise für Anwendungen bei neurologischen Erkrankungen oder im Sportbereich. Hierbei werden gezielt Rezeptoren aktiviert. Aufgrund der geschlossenzelligen Struktur, des guten Rückstellvermögens und der hohen Elastizität eignet sich EVA auch für die Verwendung in diabetesadaptierten Fußbettungen.

Die Einlage muss sowohl fräs- als auch tiefziehbar sein. Physikalisch soll sie eine hohe Materialfestigkeit und Langlebigkeit aufweisen. Die Wasseraufnahme und -abgabe richten sich nach der DIN EN 20344/45 und dienen zur Orientierung, ohne dass verbindliche Grenzwerte gefordert werden. Die Stärke der Einlage ist typenabhängig und kann variieren. Hinsichtlich der Trennkraft zwischen den Schaumschichten sowie zwischen Bezug und Schaum wird ein Mindestwert von 20 N bzw. 40 N nach DIN 54310 gefordert. Die Shore-Härte der Gesamteinlage ist abhängig vom gewählten Materialaufbau. Zudem muss das Produkt die Oeko-Tex®-Zertifizierung erfüllen und eine bestandene Zytotoxizitätsprüfung nach DIN EN ISO 10993-5 vorweisen, um die Unbedenklichkeit im medizinischen Einsatz sicherzustellen.

Die Bezugsstoffe sollen auf Basis von nachhaltigen Materialien gefertigt werden. Dabei sollen bevorzugt biobasierte oder biologisch abbaubare Stoffe eingesetzt werden, die die ökologischen Auswirkungen reduzieren. Hierzu zählen beispielsweise Fasern aus pflanzlichen Quellen wie Hanf, Flachs oder Ananas, sowie biobasierte Kunststoffe wie zum Beispiel PLA (Polylactid Acid). Alternativ sind auch synthetische Fasern möglich, wenn sie die Anforderungen an Recyclingfähigkeit und Umweltverträglichkeit erfüllen. Die verwendeten Bezugsstoffe müssen zudem spezifische physikalische und chemische Anforderungen erfüllen. Die Materialstärke soll bei ca. 0,5 mm liegen. Die Abriebfestigkeit muss nach EN ISO 12947 im Trockenzustand über 25.000 Touren und im Nasszustand über 12.500 Touren betragen. Rückseitig aufgebraute Klebstoffe dürfen nicht durch das Material schlagen, was durch geeignete Beschichtungen, Sperrfolien oder konstruktive Maßnahmen zu verhindern ist. Die Reißkraft des Bezugsmaterials muss in beide Material-Richtungen mindestens 15 N betragen (gemäß UNE 20344:2011). Das Material soll offenkantig verarbeitbar sein und beim Fräsen nicht ausfransen. Hierbei sind feinere, glatte Garne sowie kleinmaschige Gewirke gegenüber Gestricken zu bevorzugen.

In Bezug auf die Haptik ist eine Oberfläche erforderlich, die beim Einstieg gleitfähig, beim Ausstieg jedoch bremsend wirkt, um den Tragekomfort zu optimieren – insbesondere bei Trägern von Socken. Das Material sollte gut färb- und bedruckbar sein, wobei eine Migration von Farbstoffen in helles EVA zu testen ist. Daher sind Polyester- oder PLA-Mischgewebe für Sublimationsdrucke zu bevorzugen.

Umweltfreundliche, wasser- und lösemittelfreie Druckverfahren wie DTF (Direct to Film) sollen geprüft und wenn möglich eingesetzt werden. Zudem dürfen bei Wasch- und Druckprozessen maximale Schrumpfwerte von 3 bis 5 % nicht überschritten werden.

Hinsichtlich der Farbechtheiten gelten die Anforderungen gemäß DIN EN ISO 105-X12 für Reibechtheit sowie DIN EN ISO E04 für Schweißechtheit, jeweils mit mindestens Stufe 4 bei trockener und nasser Prüfung. Das Gewicht der Materialien ist typenabhängig und wird nicht explizit vorgegeben. Alle eingesetzten textilen Materialien müssen die Anforderungen an Schadstofffreiheit gemäß Oeko-Tex® Standard 100 (Produktklasse I oder II) erfüllen und der Biozidverordnung entsprechen. Zusätzlich ist eine bestandene Zytotoxizitätsprüfung nach DIN EN ISO 10993-5 verpflichtend. Exemplarische Abbildungen der fertigen Einlagen sollen als visuelle Referenz gelten und ergänzend bereitgestellt werden.

Neben den konventionellen lösemittelbasierten Klebstoffen werden auch umweltfreundlichere Alternativen in Betracht gezogen. Dazu zählen wasserbasierte Klebstoffe, die deutlich geringere Emissionen aufweisen und einfacher zu verarbeiten sind. Ebenso biobasierte Klebstoffe insbesondere im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit. Das Klebstoffsystem für orthopädische Anwendungen muss insgesamt eine hohe Anfangshaftung, eine gute Alterungsbeständigkeit sowie eine ausreichende Wärmebeständigkeit (mindestens 100 °C) gewährleisten. Die Verarbeitung soll sowohl manuell als auch maschinell möglich sein und eine wirtschaftliche Anwendung ermöglichen. Zudem sollen die Emissionswerte möglichst gering sein, um auch ergonomische und ökologische Anforderungen zu erfüllen.

3. Sammlung von Altmaterial

Zur Vorbereitung eines Konzepts zur Optimierung der internen und externen Abfallbewegungen in produzierenden Unternehmen und zur Sammlung von Altmaterial war es wichtig, einen umfassenden Überblick über die aktuellen Entsorgungsprozesse zu erhalten. Dabei stellt sich zunächst die Frage, wie viel EVA im Unternehmen wo anfällt und ob dieses sortenrein oder als Mischfraktionen entsorgt wird [53].

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf den internen Abläufen. Hier war zu erfassen, wie viele Anfallstellen es in den Betrieben gibt und wie viele Sammelbehälter im Umlauf sind. Auch die Organisation der Abholung spielt eine zentrale Rolle – insbesondere, ob sie durch Produktionspersonal oder durch gesonderte interne oder externe Stellen erfolgt [54].

Im Hinblick auf die Erfassung und Steuerung der Abfallströme galt es zu analysieren, ob die Sammelbehälter bei der Abholung dokumentiert werden und ob eine eindeutige Zuordnung der Abfallmengen zu den jeweiligen abfallerzeugenden Abteilungen möglich ist. Darüber hinaus war zu prüfen, ob die Abfallkosten den jeweiligen Bereichen verursachergerecht zugewiesen werden und ob es unternehmensinterne Anreizsysteme oder Zielvorgaben zur Reduktion von Abfallmengen gibt. Diese Aspekte, die über Befragungen vor Ort mit Fragebögen sowie mit virtuellen Meetings erörtert wurden, bildeten die Grundlage für die Entwicklung eines zielgerichteten Optimierungskonzepts, das sowohl ökologische als auch ökonomische Verbesserungen im Umgang mit Abfällen im Unternehmen ermöglichen soll [55,56].

In orthopädischen Produktionsbetrieben fallen bei der Verarbeitung von EVA-Materialien als Platten oder geklebten Blöcken/Verbundplatten regelmäßig Abfälle in Form von Verschnitt, Stanzresten, Fehlteilen oder Produktionsausschuss an. Diese Reste entstehen direkt an den

Bearbeitungsmaschinen – etwa an Schneid-, Fräs- oder Stanzanlagen – und werden sortenrein erfasst, um eine hochwertige stoffliche Verwertung zu gewährleisten. Hierfür wurden an den jeweiligen Entstehungsstellen klar gekennzeichnete Sammelbehälter bereitgestellt, die ausschließlich für EVA-Abfälle vorgesehen sind. Die Mitarbeitenden wurden umfassend dafür sensibilisiert, wie wichtig die sortenreine Trennung des Materials für das Recycling ist.

Die Sammelbehälter wurden – abhängig von Betriebsgröße und Abfallaufkommen – in geeigneter Größe bereitgestellt, meist in Form von Big Bags oder robusten Foliensäcken [57]. Der Transport der sortenrein erfassten EVA-Abfälle erfolgte von den Kundenbetrieben zu einem zentralen Sammelpunkt im Unternehmen. Dort wurden die Materialien nach Farben und Shore-Härten vorsortiert, um sie optimal auf die anschließenden Arbeitsschritte „Zerkleinern“ und „Mischen“ vorzubereiten.

4. Auswahl der Zerkleinerungsmaschine sowie die Untersuchung zum Zerkleinern der Altware zu Partikeln und Mischversuche mit unterschiedlichen Partikelarten

Zu Beginn des Projekts wurden Platten und Verbundplatten aus EVA mit dem Ziel zerkleinert, eine möglichst große spezifische Oberfläche zu erreichen. Die Auswahl geeigneter Zerkleinerungsmaschinen gestaltete sich aufgrund des leichten und flexiblen Materials als herausfordernd – insbesondere die Zuführöffnungen vieler Maschinen waren für die sperrigen Platten ungeeignet. In mehreren Vorversuchen wurden unterschiedliche Maschinen getestet, um eine Zielkorngröße von 5–6 mm zu erreichen, die für die Verarbeitung in einer Spritzgießmaschine des Instituts für Kunststofftechnik Westpfalz (IKW) notwendig ist.

Erste Tests mit Schneidmühlen der Firma Wanner zeigten, dass kleine Siebe zu Rückstau führten, sodass Versuche mit größeren Sieben notwendig wurden. Die Zielkörnung konnte nur in mehreren Schritten erreicht werden, was zu einem höheren Aufwand und steigenden Kosten führte. Die starke elektrostatische Aufladung des Materials erschwerte den Prozess zusätzlich, konnte jedoch durch den Einsatz von Absaugvorrichtungen und ionisierter Luft reduziert werden. Weitere Vorzerkleinerungsversuche wurden an Zwei-Wellen-Zerkleinerern und Scheibenhackern der Firma Husmann durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass scharfe Schneidgeometrien und passende Rotorparameter entscheidend für den Erfolg sind. Während der Einsatz von Wellenbrechern zu viel feinem Unterkorn (1–2 mm) führte, lieferte der Scheibenhacker ein besser geeignetes Vorschreddermaterial.

In einem weiteren Verarbeitungsschritt wurde das vorgeschredderte EVA-Material mithilfe von Schneidmühlen erneut zerkleinert. Dabei wurden sowohl die Messergeometrie als auch die Absaugtechnik gezielt optimiert, um die gewünschte Korngröße zuverlässig zu erzielen. Parallel dazu führte ein Partnerunternehmen ergänzende Zerkleinerungsversuche durch, bei denen erfolgreich ein gleichmäßiges Kornmaß von 3- 5 mm erreicht wurde.

Im weiteren Projektverlauf stellte sich jedoch heraus, dass es sich bei dem verwendeten EVA um Crosslinked EVA handelt – ein vernetztes Material, das sich nicht oder nur unvollständig aufschmelzen lässt und daher den ursprünglichen Prozessansatz (Wiederaufschmelzen und Neuverschäumen) erheblich einschränkt. Eine Literaturrecherche ergab, dass die Weiterverarbeitung solcher Materialien nur dann sinnvoll möglich ist, wenn sie in Pulverform vorliegen [58]. Es wurde daher definiert, was unter „Pulver“ verstanden wird, und an der Ermittlung geeigneter Partikelgrößen gearbeitet – stets auch unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit [59].

Experimentelle Vorversuche mit Haushaltsmühlen zeigten, dass kleinere Partikel zwischen 0,5 und 1 mm ein besseres Schmelzverhalten aufwiesen als Partikel > 1 mm. In weiteren Tests wurde die Mischbarkeit von 500-µm-Partikeln definierter Shore-Härte von 40 Shore und 25 Shore unterschiedlicher Hersteller und Farben untersucht. Das Ergebnis war, dass sich Materialien mit gleicher Shore-Härte unabhängig von Hersteller und Farbe im Zerkleinerungsprozess und in unseren nachfolgenden Prozessen gleich verhielten [93]. Diese Erkenntnis war entscheidend für die zukünftige Anwendung im Umgang mit gemischten Abfallströmen.

Zahlreiche Tests an der Fräse unserer Partnerfirma führten direkt ohne Zwischenschritte zur Pulverisierung von Einzel- und Verbundmaterialien. Dabei wurde auch die Rieselfähigkeit des Materials untersucht – ein wichtiger Faktor für die automatisierte Zuführung in den nächsten Prozess. Hier zeigten sich Einflüsse durch Korngröße, Form, Feuchtigkeit und elektrostatische Aufladung. Kleinere Körner rieselten tendenziell besser, größere neigten zum Verkeilen. Die Rieselzeit wurde standardisiert nach DIN EN ISO 6186 gemessen. Aufgrund der elektrostatischen Aufladung und Neigung zur Verklumpung könnte im industriellen Maßstab der Einsatz von Antistatika notwendig werden.

Mikroskopische Analysen des Fräsmaterials zeigten eine Partikelverteilung zwischen 0,17 mm und 1,2 mm. Weitere Optimierungen zur Zerkleinerung des Platten- und Verbundmaterials erfolgte gemeinsam mit einer Firma, die sich auf die Zerkleinerung von Kunststoffen spezialisiert hat, wo das Block- und Plattenmaterial zunächst auf 2 mm vorzerkleinert und anschließend in einer Feinschneidmühle auf 500 µm und 1000 µm gebracht wurde. Mit diesem Pulver wurden Schäumversuche am IKW durchgeführt. Erste Prototypen von Einlagen konnten erfolgreich mit einem Rezyklatanteil von 20 % und einem Virgin-EVA-Anteil von 80 % hergestellt werden.

Parallel dazu wurden die physikalischen Materialeigenschaften wie Shore-Härte, Rückstellvermögen, Flexibilität, Bruchdehnung, Schweißechtheit und Hydrolysebeständigkeit analysiert. Auch die Fräsbarkeit, Schleifbarkeit und Tiefziehbarkeit wurde untersucht – mit positiven Ergebnissen, insbesondere bei Materialproben mit Vernetzer. Das zuvor auf 3–5 mm zerkleinerte EVA-Material sowie das Fräsmaterial wurde mithilfe von Laborsieben in definierte Korngrößenfraktionen (1–2 mm, 0,5–1 mm und < 0,5 mm) getrennt. Anschließend erfolgte eine detaillierte Analyse der einzelnen Fraktionen unter Einsatz eines Digitalmikroskops. Mit allen drei Korngrößen wurden weiterführende Tests durchgeführt – insbesondere zur Untersuchung des Einflusses von Treibmitteln in Abhängigkeit von der Partikelgröße sowie zur möglichen Erhöhung des Rezyklatanteils auf 20–30 %.

Darüber hinaus wurde der Vernetzungsgrad des Rezyklats betrachtet – sowohl bei der Verwendung von 100 % Virgin-EVA als auch bei Mischungen mit einem Rezyklatanteil von 30 %. Das Gesamtbild des daraus hergestellten Schaums zeigt eine sehr homogene Struktur. Die Rezyklatpartikel sind vollständig in der Schaumstruktur eingebettet. Selbst bei einem Abfallanteil von bis zu 50 % ließ sich ein homogener Schaum erzeugen, in dem die Partikel fest in der Matrix eingebunden waren und kein Herausrieseln der Partikeln zu beobachten war.

5. Abfallkonzept zur Sammlung und Verwertung von EVA-Abfällen in Unternehmen

Das Logistikkonzept verfolgte das Ziel, die innerbetriebliche Sammlung und Verwaltung von EVA-Kunststoffabfällen effizienter zu gestalten, wirtschaftliche Einsparpotenziale aufzuzeigen und gleichzeitig die ökologischen Auswirkungen der Abfallentsorgung zu reduzieren. Insbesondere im Bereich der EVA-Abfälle (Ethylvinylacetat), wie sie in der Kunststoffverarbeitung und

Orthopädietechnik anfallen, bestehen bislang erhebliche Optimierungspotenziale hinsichtlich Sammlung, Trennung, Verwertung und Kostenkontrolle.

Ausgangssituation

In vielen Orthopädie-Unternehmen besteht eine deutliche Intransparenz bezüglich der anfallenden Abfallarten, ihrer Mengen, Zusammensetzung sowie der Entsorgungskosten. Es fehlt häufig an einer zentralen Verantwortung für das Abfallmanagement, insbesondere bei Unternehmen mit mehreren Standorten. Trenn- und Dokumentationspflichten nach der Gewerbeabfallverordnung werden vielfach nicht erfüllt. Gleichzeitig herrscht ein geringes Bewusstsein für rechtliche Anforderungen und Haftungsfragen. Plötzliche, nicht nachvollziehbare Preissteigerungen und der insgesamt niedrige Stellenwert der Entsorgung verstärken den Handlungsbedarf.

Schritt 1: Ist-Analyse – Sammlung von EVA-Abfällen

In einem ersten Schritt erfolgt eine Bestandsaufnahme des bestehenden Abfallmanagements, z. B. durch Vor-Ort-Begehungen bei ausgewählten Unternehmen. Ziel war es, die innerbetriebliche Sammlung sowie die eingesetzten Sammelbehälter und -systeme zu dokumentieren. Es wurde zudem analysiert, welche EVA-Abfälle in welchen Mengen anfallen – differenziert nach Verwendungszweck (z. B. Fräsmaterial, Polster, Laufsohle), Farben, Shore-Härten, Korngrößen bei Staub, Klebstoffarten und Materialkombinationen (z. B. mehrlagige Einlegesohlen). Zusätzlich wurden IST-Kosten (direkt und indirekt) erfasst und in einer Excel-Kostenanalyse dargestellt. Direkte Kosten betreffen z. B. Entsorgungs- oder Recyclinggebühren, indirekte Kosten Maschinenwartung und Personalstunden [60].

Schritt 2: Entwicklung eines alternativen Entsorgungskonzepts

Im zweiten Schritt wird ein zukunftsfähiges Entsorgungs- und Verwertungskonzept erarbeitet. Hierzu gehört die Überprüfung gesetzlicher Vorgaben (u. a. Kreislaufwirtschaftsgesetz, Gewerbeabfallverordnung) und die Zuweisung klarer innerbetrieblicher Zuständigkeiten für Sammlung, Trennung, Transport und Abholung. Für die Rückverfolgbarkeit der Abfallströme können moderne Technologien wie Barcodes, RFID-Tags oder Fluoreszenzmarker eingesetzt werden. Die Erkennung von EVA-Materialien kann z. B. über FTIR-Spektroskopie oder Thermogravimetrie erfolgen [61,62].

Ein wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit zur Vorzerkleinerung und Separierung von Verbundmaterialien direkt im Betrieb – etwa durch neu entwickelte Fräsmaschinen. Ebenso werden Strategien zur Abfallvermeidung und -reduzierung definiert, z. B. durch Materialumstellung, Prozessoptimierung oder den Einsatz von Bio-EVA. In kleineren Unternehmen muss zudem der Informationsfluss verbessert und Mitarbeitende im korrekten Umgang mit EVA-Abfällen geschult werden. Eine ökologische Bewertung der Umweltauswirkungen – etwa CO₂-Fußabdruck bei Müllverbrennung vs. Wiederverwertung – ist Bestandteil der Konzeptentwicklung [63].

Abfallkategorisierung und rechtliche Aspekte

EVA-Abfälle werden gemäß Abfallverzeichnisverordnung der Abfallschlüsselnummer 070213 zugeordnet („Abfälle aus der Herstellung, Zubereitung, Vertrieb und Anwendung von Kunststoffen“) . Für das innerbetriebliche Sammeln und den Transport sind gemäß §§ 35 und 54 KrWG keine speziellen Genehmigungen erforderlich, da es sich nicht um gefährliche Abfälle zur Beseitigung handelt [64,65].

Praktische Umsetzung der Sammlung

Bei der Sammlung bieten sich unterschiedliche Systeme an:

A. Einwegsysteme

Hierbei erfolgt die Sammlung in Säcken, die händisch oder maschinell verladen werden. Vorteile liegen in geringem Gewicht, einfacher Handhabung und Schutz vor Schmutz und Feuchtigkeit. Eine umweltfreundliche Alternative bieten biologisch abbaubare PVOH-Folien, die sich in warmem oder kaltem Wasser auflösen lassen und zukünftig aus biobasierten Rohstoffen hergestellt werden könnten [66]. Die Wahl des geeigneten Müllsacks (z. B. 660-Liter-Säcke) muss sich an Parametern wie Gewicht, Reißfestigkeit, Scharfkantigkeit, Sammelzeitraum und Volumen orientieren. PE-HD eignet sich für leichte, PE-LD für scharfkantige Abfälle. Verschlussarten (Zugbänder, Clipverschlüsse) und Sackfarbe (z. B. transparent zur Sichtkontrolle) beeinflussen die Effizienz im Betrieb.

B. Umleersysteme

Hierbei werden Abfallbehälter über Hub-Kipp-Vorrichtungen entleert und wiederverwendet. Eine Kombination mit Verdichtern oder Ballenpressen ist möglich, um Transportvolumen zu optimieren. Die Eignung des EVA-Materials zur Verdichtung muss geprüft werden

C. Austausch-/Wechselsysteme

Bei diesem System werden befüllte Sammelbehälter durch leere ersetzt, z. B. im Rahmen von Logistikketten, bei denen die Abholung mit der Lieferung neuer Ware kombiniert wird. Eine digitale Lösung per App – zur Bestellung, Abholung und Nachverfolgung – ist denkbar [67].

Logistische Hinweise

Für die Containeraufstellung ist der Platzbedarf zu berücksichtigen: Rangierflächen, Einfahrtsbreiten, Hallendurchfahrtshöhen sowie die feste Definition von Stellplätzen. Diese müssen klar gekennzeichnet sein, um eine saubere Trennung zu ermöglichen. Die Containergröße („XL“) muss zum Abfallvolumen passen und den innerbetrieblichen Materialfluss nicht behindert.

Zur Sammlung in Boxen bei größeren Abfallmengen stehen verschiedene Behältersysteme zur Verfügung. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Eurogitterboxen (120 x 80 x 80 cm). Besonders geeignet erscheinen EUROPOOL-Gitterboxen aus verzinktem Stahl oder Drahtgeflecht nach DIN 15155/8 – UIC 435-3, da sie gütegeprüft, tauschfähig und mit einem Vier-Wege-Zugang ausgestattet sind. Sie verfügen über eine Doppelvorderwandklappe, wobei eine halb abklappbare Längswand aufgrund der bevorzugten Befüllung von oben als wenig sinnvoll erachtet wird. Als Alternative können auch gängige Kunststoffboxen eingesetzt werden.

Eine weitere kostengünstige Sammelösung stellt der Einsatz von Pappkartons mit Einlegesäcken dar. Diese werden als Neuware auf Paletten geliefert. Die Säcke bestehen in der Regel aus HDPE, es können jedoch auch nachhaltigere Materialien verwendet werden. Die gefüllten Säcke werden anschließend abgeholt, zum Beispiel durch externe Dienstleister.

Für noch größere Abfallmengen bietet sich eine Containerlösung an, bei der Container unter Berücksichtigung logistischer Anforderungen bereitgestellt werden.

Zur Reduktion des Transportvolumens von Schaum- und Kunststoffabfällen stellt das Verdichten des Materials eine effiziente Maßnahme dar. Hierbei kommen verschiedene technische Lösungen zum Einsatz, die das Volumen erheblich verringern und eine platzsparende Lagerung sowie einen vereinfachten Weitertransport ermöglichen. Schneckenverdichter etwa reduzieren das Volumen von Schaumstoffen deutlich und formen kompakte Blöcke mit einer Dichte von 300 bis 400 kg/m³, die sich oft weiterverwerten oder recyceln lassen. Auch spezielle Transportlösungen mit integrierten

Presssystemen in mehretagigen Trailern tragen zur Effizienzsteigerung bei. Für die Verdichtung von EVA-Abfällen eignen sich Pressen, die über rotierende Verdichtungselemente verfügen und gleichförmige, gut stapelbare Ballen erzeugen – ein Vorteil gegenüber herkömmlichen vertikalen und horizontalen Systemen. Zudem bieten EPS-Pressen eine besonders effektive Möglichkeit, stark luftdurchsetzte Materialien mit einem Luftanteil von bis zu 98 % zu komprimieren. Sie erreichen dabei eine Volumenreduktion um den Faktor 50, wodurch das ursprünglich sperrige Material deutlich handlicher wird [68].

Die präzise Sortierung beim Orthopädiebetrieb oder bei der WEVA-TEC GmbH kann durch den Einsatz von Fluoreszenzmarkern im EVA oder/und im Bezugstoff sowie durch ein KI-gestütztes Sortiersystem verbessert werden [69].

Fazit

Ein strukturiertes Abfallkonzept für EVA-Abfälle schafft Transparenz, erhöht die Materialeffizienz und reduziert sowohl Kosten als auch Umweltbelastung. Durch die Kombination aus technischer Optimierung (z. B. Zerkleinerung und Materialtrennung), organisatorischen Maßnahmen (Zuständigkeiten, Schulungen, Logistik) und dem Einsatz neuer Technologien (z. B. Tracking-Systeme, PVOH-Folien) wird ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, der sowohl ökonomische als auch ökologische Ziele adressiert.

6. Deaktivierbarkeit von Klebstoffen

6.1 zwischen den Platten

Aktuell wird in orthopädischen Betrieben vorwiegend mit lösemittelbasierten Klebstoffsystemen zum Verkleben der Platten gearbeitet. Zum Einsatz kommen dabei vorwiegend Neoprenklebstoffe in Form von Kontaktklebstoffen meist auf Basis von Polychloropren, der ein- oder zweikomponentig verfügbar ist und sich durch eine hohe Anfangshaftung auszeichnet. Der derzeit verwendete Klebstoff in unserem Partnerbetrieb zeichnet zudem aus, dass er toluolfrei ist und eine Dichte von $0,84 \text{ g/cm}^3$ hat. Die Ablüftzeit beträgt 1–2 Minuten, die Kontaktzeit ca. 45 Minuten und die vollständige Abbindezeit etwa 24 Stunden. Die Wärmestandfestigkeit liegt bei rund 105 °C , der Feststoffgehalt im Klebstoff bei 24 % .

Vorbereitend wurde das als Standardmaterial verwendete EVA (Ethylen-Vinylacetat) in Platten verschiedener Stärken gespalten. Durch diesen Prozess werden die Oberflächen geglättet, sodass später sowohl glatte als auch zuvor geraute Flächen miteinander verklebt werden müssen. Dabei spielt die Oberflächenbeschaffenheit eine entscheidende Rolle für die Haftung: die gerauten Flächen lassen sich deutlich besser verkleben als glatte. Der Klebstoffauftrag erfolgt händisch mithilfe eines Pinsels sowie mittels Rakelauftrag. Anschließend wurden die Platten mit einer Plattenpresse verpresst. Die Trennkraft der Klebefugen wurde mittels Zwick-Maschine ermittelt.

Alle Materialien zeigten Materialriss und Trennkraft $> 40 \text{ N}$. Die Trennkraftwerte sowie die Ablüftzeiten/Taktzeiten dienen als Vorgabe für spätere Klebstoffalternativen. Im Rahmen des Arbeitspakets „Verkleben von BIO-EVA“ soll der bislang verwendete lösemittelhaltige Klebstoff langfristig durch eine nachhaltigere Alternative ersetzt werden. Aktuell steht die Verklebung der Platten jedoch nicht im Fokus, da unsere Untersuchungen ergeben haben, dass die vorhandene Klebstoffschicht beim Zerkleinern, Aufschmelzen und der Weiterverarbeitung des Materials keine

wesentliche Rolle spielt.

Nichtsdestotrotz lieferten Tests mit Standard-EVA in Kombination mit einem lösemittelfreien EVA-Transfersystem bereits vielversprechende Ergebnisse. Diese Methode konnte auch erfolgreich auf BIO-EVA übertragen werden und wird daher weiterverfolgt. Die Klebeschicht wurde bei 130 °C für 20 Sekunden mithilfe einer Handpresse aufgebracht und zeigte eine sehr gute Haftung der Schichten.

6.2 Deaktivierbarkeit von Klebstoffen zwischen Textil und Plattenmaterial

Für die Untersuchungen zur Verklebbarkeit und Deaktivierbarkeit von Textilien mit EVA-Plattenmaterialien wurden verschiedene Bezugstoffe exemplarisch ausgewählt. Dabei handelt es sich um textile Konstruktionen wie Gewirke und Gestricke mit unterschiedlichen Zusammensetzungen, darunter Polyester (PES), Polyamid (PA), Elasthan sowie deren Mischungen. Zusätzlich werden PLA-Gewirke für einen späteren Themenblock berücksichtigt. Die Materialien weisen sowohl elastische als auch unelastische Eigenschaften auf und liegen im Flächengewicht zwischen 150 und 200 g/m² vor. Es werden Varianten mit und ohne Sperrschicht betrachtet. Zum Einsatz kommen unterschiedliche Sperrschichtmaterialien: Polyurethan (PU) auf Etherbasis in Dicken von 30 µm und 50 µm (hydrolysebeständig), Polyvinylalkohol (PVA) sowie EVA mit 15 µm Schichtdicke als Monomaterial. Die Verklebung der Schichten gegen Textil erfolgt mittels Hotmelt-Klebstoffen auf Basis Co-Polyester, Co-Polyamid, Polyurethanesther, Polyolefine, BIO-TPU und Biobased Polyethylen Succinaten, wobei eine Trennkraft von etwa 15 N als ausreichend, ab 20 N als gute Haftung gewertet wird. Die verschiedenen Materialkombinationen werden hinsichtlich ihrer Haftfestigkeit vergleichend geprüft [70].

Die Bezüge wurden dann mit diversen Klebesystemen gegen EVA verklebt: Neben der Verklebung mit Hotmelts wurden weitere Klebstoffsysteme untersucht. Unter anderem erfolgte die Verklebung mit zwei Neoprenklebstoffen sowie mit Sprühkleber UHU Universal, der sich durch seine transparente Formulierung und besonders feinen Klebstoffauftrag auszeichnet [71]. Der Kleber wird aus einem Abstand von 15–20 cm dünn aufgetragen – sowohl beidseitig als auch alternativ einseitig. Nach einer Abluftzeit von ca. 15 Minuten erfolgt das sofortige Verpressen der Materialien mithilfe einer Handpresse.

Des Weiteren wurde ein Kaltkleber erprobt. Die Verarbeitung erfolgt, indem der Stanzling vom Silikonpapier abgezogen und das Futtertextil aufgelegt wird. Anschließend wird die Klebeschicht für einige Sekunden auf 70–100 °C erhitzt. Das Verpressen erfolgt mithilfe eines pneumatischen Hitzestempels oder alternativ in einer Vakuum-Pressen mit definierter Verweilzeit. Die endgültige Haftung stellt sich erst nach einer Ruhephase von mindestens 36 bis hin zu 72 Stunden ein. Versuche nach der Methode Debonding in Demand wurden mit expandierenden Microspheres in Kaltkleber eingebettet [152]. Diese Versuche brachten erfolgreiche Ergebnisse hinsichtlich Haftung und Trennbarkeit. Getestete wasserbasierte Klebstoffe brachten keine ausreichende Haftung zwischen Textil und EVA-Plattenware [153]. Textilien mit Sperrschichten ließen sich mit ausreichender guter Haftung gegen EVA verkleben [72].

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die Verklebung mit Hotmelts auf EVA-Basis sowie auf Polyurethanbasis und auf Co-Polyamidbasis neben gängigen Systemen wie Neoprenklebstoffen und Kaltklebesystemen die besten Ergebnisse bei der Haftung zu EVA-Standard-Plattenware brachte. Die Trennung der Systeme war bei Hot-Melt-Kaschierungen auf EVA-Basis und Temperaturen > 60 °C im Waschprozess möglich. Bezüge mit PVA Sperr-Folien (heißwasserlöslich) ließen sich bei 30 °C

rückstandsfrei von EVA trennen. Tests mit Schweißlösungen und Tragtests bestätigen den möglichen Einsatz dieser wasserlöslichen Folien als Sperrfolien mit späterer Trennbarkeit von EVA-Materialien. An der Rezeptur dieser Folien muss weitergearbeitet werden, um die Quellbarkeit bei Feuchteintrag zu reduzieren. Dieser Ansatz wird kontinuierlich weiterverfolgt.

7. Recherche Naturfasertextil (NFT)

Im Rahmen des Projekts wurde eine umfassende Recherche zu Naturfasertextilien durchgeführt. Ziel war es, einen Überblick über die derzeit verfügbaren pflanzlichen Faserstoffe, deren Herkunft, Eigenschaften sowie deren Potenziale im Hinblick auf Nachhaltigkeit, Verarbeitbarkeit und Einsatzmöglichkeiten in textilen Anwendungen zu gewinnen.

Die Analyse umfasste Verfügbarkeit, Ressourceneffizienz, biologische Abbaubarkeit sowie Möglichkeiten der Integration in geschlossene Materialkreisläufe. Darüber hinaus wurden auch technische Eigenschaften wie zum Beispiel Reißfestigkeit, Feuchtigkeitsmanagement, Hautverträglichkeit und Veredelungspotenzial erfasst, um eine spätere Eignungsbewertung für unsere konkrete textile Anwendung wie Einlagenstoffe, Bezugsstoffe, funktionale Textilien zu ermöglichen.

Die Recherche bildet somit eine zentrale Grundlage für die Auswahl geeigneter Materialien im weiteren Projektverlauf, insbesondere im Hinblick auf Nachhaltigkeit, Recyclingfähigkeit und innovative Verarbeitungstechnologien.

Der Fokus lag auf Fasern pflanzlicher Herkunft wie Baumwolle, Hanf, Flachs, Brennnessel sowie auf innovativen Alternativen wie Bananen-, Ananas- und Algenfasern. Untersucht wurden sowohl traditionelle Fasern mit etablierter Lieferkette als auch neuartige Materialien, die auf agrarischen Nebenprodukten oder bislang ungenutzten Rohstoffquellen basieren. Ergänzend wurden Ledernalternativen auf Basis pflanzlicher Zellulose (z. B. Apfelleder, Piñatex®) und biotechnologisch gewonnene Materialien wie bakterielle Cellulose und Myzelium-basierte Werkstoffe betrachtet. Eine Lösung könnten auch künftig biobasierte Polyurethane sein, die z. B. aus Rizinus-, Raps- oder Sojaöl gewonnen werden. [73]

NUO, ein veganes Holztextil aus nachhaltiger Forstwirtschaft, wird aufgrund seiner überzeugenden Materialeigenschaften ebenfalls als Bezugsstoff getestet. Hierbei wurde es mit einem Textilträger kombiniert, um die mechanische Stabilität zu erhöhen. Durch seine feingravierte Oberfläche eröffnet das Material vielseitige Einsatzmöglichkeiten, bei gleichzeitig deutlich geringerem CO₂-Ausstoß im Vergleich zu konventionellen Bezugsmaterialien. [74]

Neben pflanzlichen Fasern wurden im Rahmen der Recherche auch chemische Fasern untersucht, die ebenfalls einen nachhaltigen Ansatz verfolgen und Potenzial für den Einsatz als Bezugsstoff bieten. Chemiefasern aus synthetischen Polymeren – wie Polyester (PES), Polyamid (PA), Polypropylen (PP) oder Polyethylen (PE) – basierten viele Jahre auf fossilen Rohstoffen wie Erdöl, Erdgas oder Kohle. Sie zeichnen sich durch ihre hohe Funktionalität und ein gutes Innovationspotenzial aus. Dennoch tragen sie nicht zur Schonung endlicher Ressourcen bei und stehen zunehmend wegen ihrer Umweltbelastung in der Kritik. Insbesondere das Entstehen von Mikroplastik bei Produktion, Nutzung und Entsorgung stellt ein wachsendes Problem dar. [75]

Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieses Projekts nur Materialien berücksichtigt, die entweder recycelt sind oder aus biobasierten Rohstoffen bzw. Komponenten bestehen. Ein besonders

vielversprechender Ansatz ist der Einsatz recycelter Chemiefasern – etwa in Form von Upcycled Marine Plastic, wie es von der SEAQUAL INITIATIVE bereitgestellt wird. Laut WWF gelangen jährlich zwischen 4,8 und 12,7 Millionen Tonnen Plastikabfall in die Ozeane – das entspricht etwa einer LKW-Ladung pro Minute. Diese Abfälle stellen eine ernste Bedrohung für Meereslebewesen und Ökosysteme dar und führen zur Bildung von Mikroplastik, das über die Nahrungskette letztlich auch den Menschen erreicht. [76] Die SEAQUAL INITIATIVE setzt hier an und verfolgt einen ganzheitlichen Lösungsansatz: In Zusammenarbeit mit NGOs, Behörden, Forschern und Fischern wird Meeresmüll gesammelt, gereinigt und zu hochwertigem Garn weiterverarbeitet. Das daraus entstehende SEAQUAL® YARN besteht zu rund 10 % aus Upcycled Marine Plastic, also recyceltem Plastikmüll aus dem Meer. Die restlichen 90 % setzen sich aus post-consumer PET-Abfällen aus landbasierten Quellen zusammen. Für die Verarbeitung und Nutzung dieses Garns ist eine SEAQUAL-Lizenz erforderlich, die entlang der gesamten Lieferkette – von der Garnproduktion bis zum Einzelhandel – gilt. SEAQUAL® YARN ist zertifiziert nach OEKO-TEX® STANDARD 100 sowie dem Global Recycle Standard (GRS). Pro Kilogramm Garn können – je nach Herkunft – etwa 600 g bis 1 kg Meeresmüll aus der Umwelt entfernt werden. Gleichzeitig lassen sich im Vergleich zu konventionellen Fasern die CO₂-Emissionen um rund 32 % reduzieren. [77]

Ein weiterer bedeutender Recyclingansatz besteht in der Nutzung von Polyesterfasern aus alten PET-Flaschen. Polyester ist seit den 1950er Jahren fest in der Textilindustrie verankert und macht heute rund 52 % der weltweiten Faserproduktion aus. Aufgrund seiner kostengünstigen Herstellung und des geringen Wasserverbrauchs bleibt Polyester ein weit verbreitetes Material. Dennoch basiert es vollständig auf dem fossilen Rohstoff Erdöl und trägt erheblich zur Mikroplastikbelastung der Umwelt bei. Beim Tragen, Waschen und Verarbeiten von Polyestertextilien lösen sich Mikrofasern, die ungehindert in die Umwelt gelangen – allein in der Schweiz werden jährlich rund 650 Tonnen freigesetzt. [78]

Vor diesem Hintergrund setzen immer mehr Unternehmen – darunter große Marken wie Adidas, Zara oder H&M – auf recyceltes Polyester und andere wiederverwertete Materialien. Besonders verbreitet ist dabei das Recycling von PET-Flaschen, da diese sich technisch gut verarbeiten lassen. Allerdings steht dieses Vorgehen zunehmend in der Kritik: Es wird befürchtet, dass PET-Flaschen teilweise gezielt produziert werden, um sie anschließend als "Recyclingmaterial" der Textilindustrie zuzuführen – ein Vorgehen, das unter dem Begriff Greenwashing diskutiert wird. [79,80]

Positiv hervorzuheben ist jedoch, dass gesetzliche Maßnahmen die Getränkeindustrie künftig zu geschlossenen Kreislaufsystemen verpflichten und den Rezyklatanteil in Produkten deutlich erhöhen sollen. Denn während PET-Flaschen theoretisch unbegrenzt recycelbar sind, gestaltet sich das Recycling von Textilien weitaus schwieriger. [81]

Biobasierte Kunststoffe

Ein zentrales Element nachhaltiger Materialentwicklung ist der Einsatz biobasierter Kunststoffe, die ganz oder teilweise aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Ein vielversprechender Ansatz liegt in der Nutzung modifizierter natürlicher Polymere, insbesondere sogenannter Cellulose regeneratfasern. Diese werden durch umweltfreundliche Lösemittelverfahren aus pflanzlicher Cellulose – meist aus Holz – gewonnen. Im Fokus dieses Projekts steht dabei vor allem die Faser Lyocell, die aus Holz hergestellt wird, einem nachwachsenden Rohstoff, der durch Photosynthese CO₂ bindet. Die Produktion von Lyocell erfolgt in einem nahezu geschlossenen Kreislauf, bei dem sowohl Prozesswasser als auch Lösemittel zu über 99 % zurückgewonnen werden. Diese hohe Ressourceneffizienz verleiht Lyocell einen hervorragenden ökologischen Fußabdruck. Die

Fasern sind biologisch abbaubar und kompostierbar, tragen das EU Ecolabel sowie den BioPreferred®-Status des US-Landwirtschaftsministeriums. Der Hersteller verfolgt das Ziel, bis 2050 Netto-Null-Emissionen zu erreichen – unter anderem durch neue Technologien, den Einsatz alternativer Energiequellen und die Unterstützung von CO₂-Reduktionsprojekten [82].

Ein innovativer Weiterentwicklungsansatz ist Refibra™, eine Faser, die Lyocell mit recycelter Baumwolle kombiniert. Dabei werden Baumwollreste aus der Textilproduktion aufgeschlossen und mit Frischzellulose vermischt – ein Schritt in Richtung Kreislaufwirtschaft in der Textilbranche [83].

Auch industrielle Nebenprodukte dienen zunehmend als Basis für nachhaltige Materialien. Ein Beispiel hierfür ist sogenanntes Apfelleder, entwickelt vom italienischen Unternehmen Frumat. Dabei wird Trester – ein bei der Saftproduktion anfallendes Gemisch aus Schalen, Fasern und Stängeln – getrocknet, vermahlen und mit Bindemitteln zu einer lederähnlichen Oberfläche verarbeitet. Apfelleder ist vegan und hilft, Lebensmittelabfälle zu reduzieren. Allerdings enthält es meist noch kunststoffbasierte Zusätze, und sowohl die tatsächliche Ressourceneffizienz als auch die Nachhaltigkeitsversprechen sollten kritisch betrachtet werden [84].

Im Bereich experimenteller Zellulosematerialien eröffnen bakterielle Cellulose und auf Myzelium basierende Werkstoffe neue Perspektiven. Bakterielle Cellulose entsteht etwa durch die Fermentation von Kokoswasser mittels symbiotischer Kulturen aus Bakterien und Hefepilzen – ein Verfahren, das an die Herstellung von Kombucha erinnert. Unternehmen wie Malai Eco nutzen dieses Prinzip zur Produktion lederähnlicher Vliese, die rein pflanzlich, biologisch abbaubar und damit ökologisch besonders interessant sind [85].

Myzelium-Materialien werden aus Pilzgeflechten gewonnen, die auf organischen Substraten wie Sägemehl oder Textilresten wachsen. Sie bilden nach kontrolliertem Wachstum stabile, lederartige Verbundstoffe. Bekannte Entwicklungen in diesem Bereich sind Reishi™ von MycoWorks, das mit einem CO₂-Fußabdruck von nur 8 % im Vergleich zu herkömmlichem Leder überzeugt – allerdings wird für die Stabilisierung häufig ein Trägermaterial wie PES verwendet [86]. Forager™ von Ecovative basiert hingegen vollständig auf Myzel, ist vollständig biologisch abbaubar und ähnelt Leder in Haptik und Stabilität [87]. Auch Mylo™ von Bolt Threads kombiniert Pilzmyzel mit Viskose und einer PU-Beschichtung. Das Material wird bereits von Marken wie Stella McCartney verwendet, ist jedoch durch die PU-Schicht nicht vollständig biologisch abbaubar und wird daher für unseren Einsatz kontrovers betrachtet.

PLA – Polymilchsäure als biobasierter Kunststoff aus nachwachsenden Rohstoffen

PLA (Polylactid oder Polymilchsäure) ist ein biobasierter Kunststoff aus der Gruppe der Polyester, der aus stärkehaltigen Pflanzen wie Mais, Zuckerrüben oder Zuckerrohr gewonnen wird. Der Herstellungsprozess umfasst mehrere Schritte: Zunächst wird Stärke (Glukose) aus den Pflanzen extrahiert und enzymatisch in Dextrose umgewandelt. Diese dient Mikroorganismen als Substrat zur Fermentation, wobei Milchsäure entsteht. Durch anschließende Polymerisation wird daraus PLA mit langkettigen Molekülstrukturen – in seinen Eigenschaften vergleichbar mit erdölbasierten Kunststoffen [88].

PLA gilt als nachhaltige Alternative zu konventionellen Kunststoffen, da es aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wird und somit unabhängig von fossilen Ressourcen ist. Aufgrund seiner biogenen Herkunft ist PLA sowohl biologisch abbaubar als auch kompostierbar – allerdings nur unter definierten Bedingungen, wie sie in industriellen Kompostieranlagen vorliegen [89].

Trotz ökologischer Vorteile ist die Herstellung von PLA nicht unumstritten. Für 1 kg PLA werden rund 2,65 kg Mais benötigt – ein Aspekt, der ethische Fragen aufwirft, da Anbauflächen für biobasierte Kunststoffe mit der Lebensmittelproduktion konkurrieren. Angesichts des global wachsenden Nahrungsmittelbedarfs und der durch den Klimawandel gefährdeten Agrarproduktion – insbesondere in tropischen Regionen – wird zunehmend diskutiert, ob der Einsatz von Nahrungsmitteln zur Kunststoffherstellung verantwortbar ist. Bei vollständigem Ersatz konventioneller Kunststoffe durch PLA könnten jährlich über 700 Millionen Tonnen Nahrungsmittel aus der Versorgungskette entzogen werden [90].

Ein vielversprechender alternativer Ansatz liegt in der Nutzung von Lebensmittelabfällen, beispielsweise aus der Backwarenindustrie. Am PFI (Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens) wird an der Gewinnung von Milchsäure aus Backwareresten gearbeitet, mit dem Ziel, daraus PLA-Granulat herzustellen. Dieses Verfahren könnte die ethische Problematik des Rohstoffwettbewerbs entschärfen und gleichzeitig Abfälle verwerten – ein Schritt in Richtung einer zirkulären Bioökonomie und ein möglicher Ausgangspunkt für ein weiterführendes Forschungsprojekt [91].

Im Rahmen der Recherche zu nachhaltigen synthetischen Faseralternativen wurden auch biobasierte Polyamide (BIO-PA) untersucht. Diese zeichnen sich durch eine geringere Abhängigkeit von fossilen Ressourcen und eine potenziell verbesserte Umweltbilanz aus [92].

Ein Beispiel ist das von Toray entwickelte Nylon 510, ein vollständig biobasiertes Polyamid, das aus Rizinusöl und Mais hergestellt wird. Dabei dienen nicht essbare pflanzliche Reststoffe als Ausgangsmaterial zur Zuckergewinnung, aus denen durch Fermentation biobasierte Adipinsäure entsteht – ein zentraler Baustein für Polyamid 6.6 [93].

Ein weiteres innovatives Produkt ist EVO® von Fulgar, ein Polyamidgarn aus Rizinusöl. Die Rizinuspflanze wächst auf kargen Böden, benötigt kaum Wasser und steht nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. EVO® gilt als zu 100 % biobasiert, leicht, elastisch, atmungsaktiv, schnelltrocknend und bietet eine natürliche bakteriostatische Wirkung. Durch seine hohe Elastizität und Wärmedämmung eignet sich das Material für Sport- und Funktionsbekleidung mit hohem Tragekomfort. Zudem lässt es sich gut bei niedrigen Temperaturen färben und ist nach mehreren Standards zertifiziert, darunter OEKO-TEX® Standard 100 Klasse I und DIN CERTCO [94].

Besonders hervorzuheben ist der Herstellungsprozess auf Basis der Pflanzenchemie: Die in der Rizinuspflanze natürlich vorkommenden Monomere werden direkt polymerisiert, was energieeffizienter ist als die Spaltung größerer Moleküle bei erdölbasierten Polyamiden. Biobasierte Polyamide wie EVO® und Nylon 510 bieten somit eine zukunftsfähige Alternative zu konventionellen, erdölbasierten Kunstfasern und leisten einen Beitrag zur Reduktion von CO₂-Emissionen sowie zur Ressourcenschonung [95].

Eine vielversprechende Innovation stellt auch Toughtex® by Nature dar – ein Hochleistungsgewebe auf Basis von biobasiertem Polyamid 6.6, das von Nilit entwickelt wurde, um den Verbrauch fossiler Ressourcen zu senken und den CO₂-Fußabdruck signifikant zu reduzieren. Bei diesem Material wird im Vorstufenprozess zur Polymerherstellung ein Teil der fossilen Ausgangsstoffe durch nachwachsende Rohstoffe ersetzt. Zusätzlich wird erneuerbare Energie aus Biomassequellen in der Produktion verwendet. Das zugrundeliegende Verfahren basiert auf dem von BASF entwickelten Biomassenbilanz-Ansatz (BMB) und ist nach ISCC PLUS zertifiziert. So lassen sich bis zu 1.800 kg CO₂ pro Tonne Polyamid im Vergleich zu konventionell hergestelltem PA 6.6 einsparen, ohne Einbußen bei Qualität oder Performance. Das Verfahren funktioniert ähnlich wie ein Ökostrommix: Fossile und biogene Quellen fließen gemeinsam in den Produktionsprozess ein, wobei der biogene Anteil bilanziell einem bestimmten Produkt zugeordnet wird [96].

Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit, Toughtex® by Nature aus recyceltem Bioabfall herzustellen – wodurch zusätzliche Kreislaufaspekte in die Materialentwicklung einbezogen werden. Für textile Anwendungen ist eine Kooperation mit Wirkern vorgesehen, da die verfügbaren Gewebe als Bezugstoffe nicht geeignet waren .

Neben Polyamiden wurde auch biobasierter Polyester aus Abgasen als alternative Materialquelle untersucht. Hierbei wird Monoethylenglycol (MEG) – einer der beiden Grundbausteine von PET – nicht aus Erdöl, sondern zum Beispiel mithilfe eines Gasfermentationsprozesses aus Industrieabgasen (z. B. CO, CO₂, H₂) gewonnen. Spezielle Bakterien wandeln diese Gase in MEG um. Dieses Verfahren ermöglicht es, Abfälle als Rohstoffquelle zu nutzen und gleichzeitig Emissionen in Wertstoffe umzuwandeln [97].

Zwar besteht PET derzeit noch hauptsächlich aus terephthalischer Säure (PTA), jedoch ist es bereits gelungen, die MEG-Komponente vollständig biobasiert herzustellen. Unternehmen wie Vaude haben daraus erste Fleece-Stoffe produziert. Das finnische Unternehmen UPM investiert zudem rund 1,3 Milliarden Euro in eine Bioraffinerie in Leuna (Sachsen-Anhalt), um künftig biobasiertes MEG und möglicherweise auch PTA im industriellen Maßstab herzustellen – mit dem langfristigen Ziel einer klimaneutralen Polyesterproduktion [98].

Diese Beispiele zeigen, wie durch gezielte technologische Innovation sowohl fossile Ressourcen eingespart als auch CO₂-Emissionen reduziert werden können – bei gleichzeitig hoher Funktionalität und Qualität der Materialien.

8. Beschaffung und Analyse NFT

Im Zuge der Materialrecherche wurden vielfältige textile Bezugstoffe mit Fokus auf Nachhaltigkeit beschafft und auf praxisrelevante Eigenschaften untersucht. Das Materialportfolio umfasste sowohl oben genannte innovative Recycling- und Biopolymere als auch klassische Naturfasern sowie neuartige pflanzenbasierte Materialien.

Unter den synthetischen Alternativen wurden u. a. Recycling-Polyester (rPES), PES aus Abgasen, Mischungen mit rezykliertem PES sowie PES aus Meeresmüll (Seaqual®) in Kombination mit Neeware-PES analysiert. Im Bereich der Naturfasern wurden Muster aus biologisch angebaute Baumwolle (Bio-Baumwolle), Hanf, Flachs, Wolle (100 % und Stretchvarianten mit Elasthan) sowie Lyocell in diversen Mischverhältnissen mit Baumwolle, Viskose und recyceltem Polyester getestet. Ergänzt wurde das Portfolio durch neuartige pflanzenbasierte Materialien wie Bananatex®, Nuo® (Holzfaserverbundmaterial), LOVR (biobasierte Alternative), sowie PLA- und EVO®-basierte Mischtextilien (z. B. PLA/PBT, EVO/PA, PES/Hanf, Lyocell/PES).

Ziel war es, textile Materialien mit nachhaltigem Hintergrund zu identifizieren, die gleichzeitig den funktionellen Anforderungen an einen robusten und langlebigen Bezugstoff gerecht werden.

Untersuchungen & Tests

Die Muster wurden verschiedenen Tests unterzogen, die sowohl technische Leistungsfähigkeit als auch Verarbeitungseignung bewerten nach Abriebfestigkeit, Farbechtheit, Wasserdampfaufnahme und -abgabe, Kantenstabilität, Flexibilität, Schleifbarkeit sowie Beständigkeit gegenüber saurer und alkalischer Schweißlösung wurden intern sowie mit Unterstützung der Fachhochschule Kaiserslautern am Standort Pirmasens durchgeführt.

Zusätzlich fanden Verklebungstests statt, insbesondere hinsichtlich Klebstoffdurchschlag und

Haftungseigenschaften.

Besondere Beachtung fanden pflanzenbasierte Lederalternativen wie Desserto® (Kaktusleder mit PU-Beschichtung), Sidra, Korkverbundmaterialien sowie Pinatex® (Ananasblatffasern). Hierbei wurden im Detail folgende Materialkennwerte analysiert:

Lichtechtheit unter Xenonlichtbestrahlung (24 h).

Scheuerbeständigkeit (Martindale 7.500 Touren): Massenverluste – Desserto (0,40 %), Sidra (0,60 %), Kork (0,88 %) und Pinatex (0,56 %)

Höchstzugkraft und Dehnung: Desserto (1,1 mm Dicke) erreichte eine Zugkraft von 23,0 N/mm² bei 28 % Dehnung. Kork (0,9 mm) lag bei 17,7 N/mm² / 27 %, Sidra (0,7 mm) bei 11,7 N/mm² / 27 %, während Pinatex (1,5 mm) mit 3,0 N/mm² / 38 % Dehnung deutlich niedrigere Festigkeitswerte aufwies.

Wasserdampfdurchlässigkeit (mg/(cm²*h)): Leder (4,6) Desserto (0,6), Sidra (n.n.), Pinatex (2,6)

Kurzfasit:

- Lichtechtheit: Alle getesteten Materialien zeigten keine sichtbaren Veränderungen.
- Mechanische Stabilität: Desserto und Kork weisen die höchste Zugkraft auf, während Pinatex bei der Dehnung führt, aber sehr geringe Festigkeit zeigt.
- Atmungsaktivität: Echtes Leder ist hier weiterhin klar überlegen – die getesteten pflanzlichen Alternativen zeigen niedrigere Wasserdampfdurchlässigkeit.
- Scheuerbeständigkeit: Alle vier getesteten Materialien haben geringe Massenverluste, was für gute Beständigkeit spricht.

Die vorliegenden Testergebnisse sowie lieferten eine Grundlage für die Auswahl nachhaltiger Textilmaterialien und zeigen, dass verschiedene biobasierte und recyclingfähige Materialien funktionale und ökologische Anforderungen gleichermaßen erfüllen können. Im nächsten Schritt ist eine engere Zusammenarbeit mit Herstellern und Forschungspartnern zur weiteren Produktentwicklung und Optimierung geplant

Übersicht nachhaltiger Textilmaterialien & Bemerkungen			
Materialauswahl	Herkunft	Eigenschaften	Bemerkungen
Recycling-PES	rPET aus Alttextilien und/oder Flaschen	Ressourcenschonend, gute Standardperformance	Gute physikalische Eigenschaften, je nach Mischanteil
PES aus Abgasen	Gasfermentation von CO, CO ₂ , H ₂	CO ₂ -reduzierter Herstellprozess	Schwankende physikalische Materialeigenschaften
Seaqual® PES	Recycler Meeremüll	Nachhaltig, vergleichbar mit herkömmlichem PES	Mischvarianten getestet, gute Abriebfestigkeit mit

			PES- oder PA-Mischungen
Bio-Baumwolle	Kontrolliert biologischer Anbau	Natürlich, hautfreundlich	Mangelnde Abriebfestigkeit, hoher Wasserverbrauch
Hanf	Naturfaser, schnell wachsend	Robust, antibakteriell, feuchtigkeitsregulierend	In Mischung mit BW oder PES verarbeitet, gute Performance, ausreichende Abriebfestigkeit
Flachs / Leinen	Naturfaser, Europa-Anbau möglich	Kühlend, antistatisch, hohe Festigkeit	Mischungen mit rPES und BW getestet zur Verbesserung des Abriebs
Bananatex®	Abfallprodukt der Bananenpflanze	Biologisch abbaubar, robust	Nur als Gewebe verfügbar, gute Feuchteaufnahme, keine Schnittkantenfestigkeit ohne Beschichtung
Nuo®	Holztextil	Gute Optik nachhaltig, formstabil	Gute Oberflächenwirkung, geeignet für dekorative Anwendungen, gute Feuchteaufnahme, gute Abriebfestigkeit
Wolle	Tierische Naturfaser	Wärmend	Positiv in Haptik, wegen mangelndem Abrieb bedingt für Bezugsstoffe geeignet,
Lyocell / Tencel™	Zellulosefaser aus FSC-Holz	Seidig, atmungsaktiv, biologisch abbaubar	nachhaltige Produktion, Abriebfestigkeit in Mischungen gegeben, sehr gute Feuchteaufnahme
PLA	Aus Maisstärke / Milchsäure	Biobasiert, industriell kompostierbar	Gute Abriebfestigkeit, als Gewirke gut einsetzbar, schnell trocknend

EVO® (Fulgar)	Rizinusöl-basiert	Ultraleicht, elastisch, antibakteriell, 100 % biobasiert	Schnell trocknend, gute Performance bei niedrigem Flächengewicht, gute Abriebfestigkeit
LOVR	Biobasiertes Material aus Reststoffen	Biologisch abbaubar, innovativ	Haptik und Optik mit Optimierungsbedarf, gute physikalische Eigenschaften
Desserto®	Kaktusleder (mit PU)	Lederalternative, robust	gute Zugfestigkeit (23,0 N/mm ²), geringe WD-Durchlässigkeit
Korkverbund	Naturkork auf Träger	Atmungsaktiv, natürlich, formstabil	mittlere Zugfestigkeit, WD-Durchlässigkeit n.n.
Sidra	Apfelschalen-Reststoffe	Vegan, glatte Oberfläche	mittlere Zugfestigkeit, WD-Durchlässigkeit n.n.
Pinatex®	Ananasblatffasern	Biobasiert, textilartig, leicht	geringe Zugfestigkeit, gute WD-Durchlässigkeit 2,5
Appleskin / Vegea	Fruchtabfälle (Apfel, Traube)	Lederalternative, vegan	Geringe WD-Durchlässigkeit begrenzte Elastizität

Legende:

- WD = Wasserdampfdurchlässigkeit
- n.n. = nicht numerisch angegeben
- Alle Prüfungen: *unter bedingt standardisierten Bedingungen durchgeführt*

9. Zerkleinern und Mischen von BIO EVA Schaum

Die Zerkleinerung und Aufbereitung des BIO-EVA erfolgte exemplarisch an Musterplatten, die am Institut für Kunststofftechnik Westpfalz im Labormaßstab hergestellt wurden.

Dabei kamen die gleichen Prozessparameter und Zerkleinerungsmethoden zum Einsatz wie bei herkömmlichem Standard-EVA.

Im Rahmen der Untersuchungen zeigte sich, dass sich das eingesetzte BIO-EVA beim Zerkleinern ähnlich verhielt wie Standard-EVA mit höherer Shore-Härte. Dieses Verhalten lässt sich auf den vergleichsweise niedrigen Vinylacetat-(VA)-Anteil von lediglich 19 % im verfügbaren BIO-EVA zurückführen.

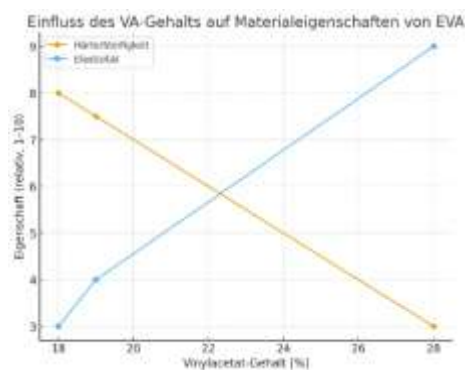
Grundsätzlich gilt: Ein niedriger VA-Gehalt im EVA – typischerweise im Bereich von 18–20 % – führt zu einem härteren, steiferen Material mit höherer Kristallinität. Bei einem höheren VA-Anteil von etwa 25–30 % nimmt die Kristallinität ab, und das Material weist deutlich weichere, elastischere sowie

gummielastische Eigenschaften auf. Diese strukturellen Unterschiede wirken sich unmittelbar auf die mechanische Bearbeitbarkeit sowie das thermische Verhalten während der Verarbeitung aus.

Das getestete BIO-EVA mit 19 % VA zeigte dementsprechend ein festeres, spröderes Verhalten im Vergleich zu weicheren EVA-Typen, wie etwa dem eingesetzten Standard EVA mit 28 % VA. Daher verlief die Zerkleinerung problemlos und effizient, ohne dass es zu unerwünschten Materialverformungen oder übermäßigem Verschleiß an den Zerkleinerungswerkzeugen kam.

Diese Ergebnisse sind insbesondere im Hinblick auf eine mögliche industrielle Verwertung relevant, da sie bestätigen, dass auch biobasierte EVA-Typen mit niedrigem VA-Gehalt sich mit etablierten Verfahren gut verarbeiten und recyceln lassen.

Die Grafik veranschaulicht den Zusammenhang zwischen dem VA-Gehalt und den Materialeigenschaften (Härte/Steifigkeit und Elastizität)



Mischen der Partikel

Beim Mischen der BIO-EVA-Partikel zeigte sich, dass der Prozess ohne Anpassungen an den üblichen Verfahren durchgeführt werden konnte. Analog zum Standard-EVA erfolgte die Homogenisierung der Partikel unter identischen Prozessbedingungen. Dabei traten weder Unterschiede im Fließ- noch im Mischverhalten auf. Die BIO-EVA-Partikel ließen sich gleichmäßig verteilen, was eine stabile und reproduzierbare Materialmischung gewährleistete. Diese Ergebnisse bestätigen, dass BIO-EVA trotz seines niedrigeren Vinylacetat-Gehalts problemlos in bestehende Mischprozesse integriert werden kann, ohne die Prozesssicherheit oder die Qualität der Endprodukte zu beeinträchtigen.

10. Verkleben von Bio EVA Platten

Die Klebetests wurden in Anlehnung an die standardisierten EVA-Plattenversuche durchgeführt und zusätzlich durch Prüfungen mit wasserbasierten Klebstoffsystemen ergänzt. Letztere zeigten hinsichtlich der Haftfestigkeit vergleichbare Ergebnisse zu den etablierten Verfahren, erwiesen sich jedoch aufgrund der langen Trocknungs- und Aushärtungszeiten als nicht praxistauglich für eine wirtschaftliche Umsetzung im industriellen Maßstab. Im Gegensatz dazu lieferten Transfersysteme mit thermoplastischen EVA-Schichten überzeugende Resultate. Sie ermöglichen eine prozesssichere und zeiteffiziente Applikation, sind kostengünstig in der Umsetzung und kommen ohne den Einsatz organischer Lösungsmittel aus. Dies stellt sowohl aus betriebswirtschaftlicher als auch aus umwelttechnischer Sicht einen klaren Vorteil dar. Dieser Ansatz wird weiterverfolgt

11. Zerkleinern und Mischen von BIO-EVA Verbundschaumplatten

Beim Zerkleinern und Mischen von BIO-EVA-Verbundschaumplatten zeigte sich, dass die etablierten Verfahren aus der Standard-EVA-Verarbeitung ohne Einschränkungen angewendet werden konnten. Die Schaumplatten wurden zunächst mechanisch zerkleinert, wobei das Materialverhalten dem von Standard-EVA mit vergleichbarer Shore-Härte entsprach. Dank der homogenen Zellstruktur und der ausreichenden Materialsteifigkeit verlief der Zerkleinerungsprozess effizient und ohne nennenswerten Werkzeugverschleiß.

Anschließend erfolgte das Mischen der Partikel unter identischen Bedingungen wie bei herkömmlichem EVA. Auch hier konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden: Die BIO-EVA-Partikel ließen sich gleichmäßig in die Matrix einarbeiten und bildeten ein homogenes Schüttgut. Damit ist sichergestellt, dass das biobasierte Material problemlos in bestehende Prozessketten integrierbar ist.

Fachlich relevant ist zudem, dass die gute Zerkleinerbarkeit sowie die stabile Mischbarkeit eine hohe Recyclingfähigkeit des Materials nahelegen. Dies unterstreicht die Eignung von BIO-EVA-Verbundschaumplatten für industrielle Anwendungen, insbesondere im Hinblick auf eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft.

12. Herstellung von Schuheinlagen

Im Rahmen der Untersuchungen zur Herstellung von Schuheinlagen wurden Platten aus BIO-EVA mit definierten Abfallanteilen (15 % bis maximal 30 %) am Institut für Kunststofftechnik hergestellt und weiterverarbeitet. Die Platten wurden in mehreren Prozessschritten geschnitten, gespalten, tiefgezogen, verformt und gefräst, sodass verschiedene Geometrien und Schichtaufbauten realisiert werden konnten.

Durch den Einsatz sowohl physikalischer als auch chemischer Treibmittel bei einem Vinylacetat-(VA)-Anteil von 19 % konnten unterschiedliche Shore-Härten im festeren Bereich erzielt werden. Dies ermöglichte die gezielte Einstellung der Materialeigenschaften, sodass die Sohlen hinsichtlich Dämpfung, Elastizität und Rückstellverhalten an spezifische Anforderungen angepasst werden konnten.

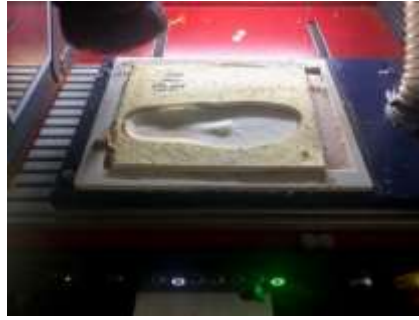
Die Untersuchungen bestätigten eine gute Tiefziehfähigkeit sowie eine präzise Fräsbarkeit des BIO-EVA-Materials. Damit eignet es sich sowohl für thermische Umformprozesse als auch für spanende Nachbearbeitungen. Zum Vergleich wurden analoge Versuchsreihen mit Standard-EVA (28 % VA) durchgeführt, ebenfalls unter Beimischung von 15 %, 20 %, 30 %, 40 % sowie 50 % Abfallanteilen.

In beiden Materialvarianten konnten erfolgreich prototypische Sohlen hergestellt werden, die abschließend mit nachhaltigen Textilien kaschiert wurden. Dieses Kaschieren bietet nicht nur eine verbesserte Oberflächenhaptik und Feuchtigkeitsaufnahme, sondern steigert auch die ökologische Wertigkeit der Einlagen durch den Einsatz nachhaltiger Materialien.

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl BIO-EVA mit Recyclinganteilen als auch Standard-EVA mit Recycling Anteilen eine vielversprechende Basis für die industrielle Fertigung funktionaler und nachhaltiger Schuheinlagen darstellen.



BIO-EVA mit 30 % Produktionsabfall



gefräste Einlage Bio-EVA



Bild 1

Bild 2

Bild 3

Bild 4

Bild 1 und 2: 2 Prototypen EVA mit 30 % Produktionsabfall, tiefgezogen

Bild 3: Sohle von Bild 2 gefräst

Bild 4: Kombination von BIO-EVA mit Standard EVA + Produktionsresten + Bezugsstoff Nuo®

Umsetzung der Vorversuche mit Industriepartnern

Im Schulterschluss mit einem Industriepartner wurden parallel zu den Versuchen zur Plattenherstellung an der Fachhochschule Regranulate aus Standard-EVA und BIO-EVA mit Produktionsresten hergestellt. Grundlage bildeten dabei die Rezepturvorschläge des Instituts für Kunststofftechnik, die hinsichtlich Additivierung, Verarbeitungsparametern und Materialkombinationen angepasst wurden. Auf Basis dieser Regranulate konnten erste Spritzgießteile in Form standardisierter Prüfkörper gefertigt werden.

Die gefertigten Prüflinge wurden einer umfassenden Bewertung physikalisch-mechanischer Parameter unterzogen. Hierzu zählten insbesondere Zug- und Biegeprüfungen, Dichtebestimmungen, Shore-Härtemessungen sowie Schlagzähigkeitstests. Ergänzend erfolgten thermische Analysen (DSC, TGA), um das Kristallisations- und Schmelzverhalten sowie die thermische Stabilität zu charakterisieren.

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass sowohl Standard-EVA als auch BIO-EVA in regranulierter Form eine Verarbeitbarkeit im Spritzguss zur Herstellung von Prüflingen aufweisen.



Unterschiede ergaben sich insbesondere in der Härte und Elastizität, bedingt durch den unterschiedlichen VA-Gehalt. Während Standard-EVA mit höherem VA-Anteil weichere, elastischere Prüfkörper ergab, zeigten die BIO-EVA-Prüfkörper aufgrund des niedrigeren VA-Gehalts ein festeres, spröderes Verhalten.

EVA	190 °C/ 2.16 kg	MFR in g/10 min.	Dichte in g/cm ³	Dehnung in %	Schmelze %	Zugfestigkeit in MPa	Elastizitätsmodul in Mpa	Shore D
Virgin 19 %		2,22	0,937	312	94	7,159	13,863	37
Virgin + 20 % Frässtaub		1,14	0,965	258	96	6,929	17,8545	37
Bio 19 %		1,98	0,937	354	92	7,672	14,19	38
Bio + 20 % Frässtaub		1,08	0,967	278	94	7,58	20,554	39

Zur Plattenherstellung erwies sich das Spritzgießverfahren leider als nicht praktikabel.

Das Hauptproblem beim Spritzgießen unseres vernetztem EVAs lag in der aktuellen Unvereinbarkeit der thermoplastischen Anforderungen des Spritzgießverfahrens mit dem chemischen Vernetzungsprozess von EVA. Für vernetztes EVA erschienen uns andere Verfahren besser geeignet, da sie die notwendige Kontrolle über die Aushärtebedingungen und die Vernetzung des Materials bieten. In unserem Fall vernetzte das Material zu früh, bevor es die Form vollständig ausfüllte.

Alternativ wurden daher aus den BIO-EVA- sowie Standard-EVA-Regranulaten, die einen Abfallanteil von 30 % - 40 % EVA enthalten in Zusammenarbeit mit einem weiteren Industriepartner Platten im Heizpressverfahren hergestellt. Die Prozessparameter Temperatur, Zeit und Druck wurden als variierende Einflussgrößen systematisch untersucht. Die Platten durchliefen anschließend verschiedene Verarbeitungsprozesse: Sie wurden gespalten, gehackt, verklebt, tiefgezogen und gefräst. Durch diese Prozesskette konnte sowohl die mechanische Bearbeitbarkeit als auch die Weiterverarbeitungsfähigkeit des Materials untersucht werden. Dabei stand insbesondere die Bewertung der Materialeigenschaften wie Formstabilität, Oberflächenqualität und Verarbeitungsflexibilität im Vordergrund, um die Einsatzmöglichkeiten der Regranulate für industrielle Anwendungen praxisnah zu prüfen.

Platten mit einem Abfallanteil von 30 % wiesen eine weitgehend homogene Materialdicke sowie eine

gleichmäßige Oberfläche auf. Vereinzelt traten feine Rissbildungen auf. Die gemessene Shore-Härte lag im Bereich zwischen 40 und 50 Shore.

Im Gegensatz dazu zeigten Platten mit einem höheren Abfallanteil (Mischung aus 30 % und 50 %) eine ausgeprägte Rissbildung, ungleichmäßige Oberflächenstrukturen sowie stark schwankende Shore-Härtewerte.



Platten aus den EVA mit Produktionsresten sowie aus BIO-EVA mit Produktionsresten aus Vorversuchen und Praxisversuchen wurden zu EVA Rohlingen aufgebaut

In einem nächsten Schritt erfolgte die Verklebung unterschiedlicher Kombinationen aus Textilien und Lederersatzstoffen, deren Auswahl im Arbeitspaket 1.3.3 definiert worden war. Diese Materialien wurden in ausreichender Größe sowohl mit als auch ohne zusätzliche Polsterschichten verarbeitet. Als Polstermaterialien kamen dabei recycelter PU-Schaum sowie recycelter TPE-Schaum zum Einsatz.

Für die Anbindung der Decklagen an das EVA-Substrat wurden die identifizierten Hotmelt-Klebstoffe auf EVA-Basis und Polyolefinbasis eingesetzt. Perspektivisch ist vorgesehen, auch Hotmelt-Systeme aus recyceltem EVA zu prüfen, um den Recyclinganteil im Gesamtsystem weiter zu erhöhen. Als Sperrschicht bei Materialien ohne Unterpolster wurde eine PVA-Folie getestet, die mit EVA Hot Melt und PBS Hot Melt gegen die jeweilige Textilschicht verklebt wurde.

Ziel der Untersuchungen war die systematische Bewertung unterschiedlicher Material- und Prozesskombinationen hinsichtlich Verbundfestigkeit, Alterungs- und Medienbeständigkeit, Oberflächenqualität sowie der gezielten Trennbarkeit nach Praxistests und Trageproben.

13. Lösen der Kaschierung

Mit den kaschierten Einlagen wurden anschließend, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Klebstoffsysteme, Trennungstests der textilen Schicht von den EVA-Platten durchgeführt.

1. Thermisch aktivierbare Klebeschichten (Hot Melt): Trennung durch Temperatureintrag > 200 °C im Ofen
2. Thermisch aktivierbare Klebeschichten (Hot melt): Belastung bei < 10 °C im Gefrierfach.
3. PVA-Folien mit Hot Melts: Trennungstest in der Waschmaschine bei 30 °C.
4. SBS-Klebstoffe (Styrol-Butadien- Styrol-Copolymere) mit niedriger Verarbeitungstemperatur und Mikrokapseln mit hoher Aktivierungstemperatur: Trennung mittels Heizpresse bei 200 °C sowie durch Mikrowellenbehandlung.

Die Trennung der Schichten war in allen Fällen erfolgreich, mit Ausnahme der Kältetests, bei denen die Verbindung stabil blieb. Ziel der Untersuchungen war es, die Eignung der Material- und Prozesskombinationen hinsichtlich Verbundfestigkeit, Alterungs- und Medienbeständigkeit, Oberflächenqualität sowie gezielter Trennbarkeit zu bewerten und die Grundlage für eine nachhaltige, industriell skalierbare Serienanwendung zu schaffen.

Darüber hinaus gilt es zu eruieren, welche Trennmethode unter Nachhaltigkeitsaspekten am sinnvollsten ist. Dabei sind Energieverbrauch, Energieeffizienzklasse, Fassungsvermögen, Betriebstemperaturen der Geräte und Stromkosten entscheidende Kriterien, um eine ressourcenschonende und wirtschaftlich praktikable Lösung zu identifizieren.

14. Charakterisierung der Einlage

Die Einlage wurde auf Basis des zuvor erstellten Lastenheftes sowie unter Verwendung des entwickelten Datenblattes für Einlagenrohlinge charakterisiert. Dabei wurden die relevanten physikalischen, mechanischen und funktionellen Eigenschaften systematisch überprüft und dokumentiert.

15. Probandentests

Zur Bewertung der Praxistauglichkeit wurden 15 Probanden ausgewählt, die die Einlagen über einen Zeitraum von 14 Tagen im Alltag trugen. Die Beurteilung erfolgte anhand eines eigens entwickelten Fragebogens, der Aspekte wie Tragekomfort, Passform, Feuchtigkeitsmanagement und allgemeine Zufriedenheit abdeckte.

Parallel zu den Anwendungstests wurden Prüfungen auf Hautirritationen sowie Zytotoxizität an ausgewählten Mustern durchgeführt. Ziel war es, die biokompatiblen Eigenschaften der Materialien sicherzustellen und mögliche gesundheitliche Risiken auszuschließen.

16. Herstellung prototypischer Schuheinlagen

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden erste Prototypen von Schuheinlagen aus dem Material WEVA – ORTH gefertigt. Zum Einsatz kam ein Regranulat mit einem Abfallanteil von 15 % sowie eines von 30 %, jeweils in einer Shore-Härte von 40. Die Einlagen wurden in einem zweilagigen Aufbau realisiert. Als Bezugstoffe fanden Recycling-Polyester, Lyocell-Gewirke sowie das nachhaltige Material NUO® Verwendung (74).

17. Prozessoptimierung

Für eine reproduzierbare Qualität der Einlagen muss insbesondere die Rezeptur hinsichtlich Auswahl und Dosierung des Treibmittels weiter optimiert werden. Darüber hinaus sind die Prozessparameter der Heizpresse entsprechend anzupassen. Ziel ist es, eine konstante Produktqualität bei gleichzeitigem Erhalt eines Abfallanteils von 30–35 % sicherzustellen.

18. Voraussichtlicher Nutzen und zukünftige Planungen

Die im Rahmen des Projekts erzielten Ergebnisse bieten einen deutlichen Nutzen, insbesondere hinsichtlich der verbesserten Verwertbarkeit der entwickelten Materialien und Prozesse. Die gewonnenen Erkenntnisse zu den Materialeigenschaften, Klebstoffsystemen und Recyclingmethoden bilden eine solide Grundlage für die nachhaltige Weiterverarbeitung von BIO- und Standard-EVA. Durch die Optimierung von Rezepturen, Treibmittelanteilen und Prozessparametern können künftig qualitativ hochwertige Platten mit reproduzierbaren Eigenschaften hergestellt werden, bei gleichzeitiger Integration eines definierten Abfallanteils von 15-30 %.

Für die nähere Zukunft ist geplant, die entwickelten Ansätze systematisch zu skalieren und in die industrielle Anwendung zu überführen. Dazu gehören die fortlaufende Weiterentwicklung nachhaltiger Klebstoffalternativen, die Optimierung der Verarbeitungsprozesse an der Heizpresse sowie die Evaluierung der Energieeffizienz und Ressourcenschonung. Die Umsetzung dieser Maßnahmen erfolgt im Sinne eines fortgeschriebenen Verwertungsplans, der darauf abzielt, die Materialkreisläufe zu schließen, die Nachhaltigkeit zu erhöhen und die industriellen Einsatzmöglichkeiten der recycelten EVA-Produkte zu erweitern.

Literaturverzeichnis

1. Birley, A.W., Heath, R.J., & Scott, M.J. "Plastics Materials: Properties and Applications." Springer, 2019, link.springer.com/book/10.1007/978-1-4615-3664-2
2. Scheirs, J. "Polymer Recycling: Science, Technology and Applications." Wiley, 1998, www.wiley.com/en-us/Polymer+Recycling%3A+Science%2C+Technology+and+Applications-p-9780471970545
3. Wu, Z., Shangguan, Y., Zhang, C., & Zheng, Q. "Effects of Crosslinking and Silicone Coupling Agent on Properties of EVA Composite Hot Melt Adhesive." *Polymers (MDPI)*, 2021, doi.org/10.3390/polym13234101
4. Niemczyk, A., Brajnicov, S., Satulu, V., Baranowska, J., Mitu, B., & Dinescu, M. "Chemical Structure Modification of EVA Copolymer upon MAPLE Processing of Thin Films." *International Journal of Molecular Sciences (MDPI)*, 2021, doi.org/10.3390/ijms222111686
5. Kutnjak-Mravlinčić, S., Akalović, J., & Bischof, S. "Merging Footwear Design and Functionality." *AUTEX Research Journal (De Gruyter)*, 2020, doi.org/10.2478/aut-2019-0023
6. Ramachandran, A., Reghunadhan, A., Maria, H.J., & Thomas, S. "Role of Functional Polymers in the Compatibilization of Polymer Blends." *Reactive and Functional Polymers*, Vol. 2. Springer, 2020, link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-45135-6_2
7. United States Patent Office. "Phase Change Material Heat Sink Using Additive Manufacturing and Method." US Patent 10,123,456 B2, 2018, patents.google.com/patent/US10123456B2/en
8. Paiva Júnior, C.Z., Mendonca, A.V., Fim, F.C., & Silva, L.B. "Recycling EVA Waste: An Opportunity for the Footwear Industry." *Journal of Polymers and the Environment (Springer)*, 2022, doi.org/10.1007/s10924-021-02332-x
9. McKinsey & Company, Global Fashion Agenda. "Fashion on Climate: How the Fashion Industry Can Urgently Act to Reduce Its Greenhouse Gas Emissions." McKinsey Report, 2020, www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/fashion-on-climate
10. Statista Research Department. "Textile and Clothing Industry in Germany – Statistics & Facts." Statista, 2021, www.statista.com/topics/11510/textile-and-clothing-industry-in-germany
11. Journal of Polymer Science. "Ethylene-Vinyl Acetate: Global Production and Market Development." *Journal of Polymer Science*, 2021, onlinelibrary.wiley.com/journal/10990518
12. Global Market Insights. "EVA Market Predictions until 2026." *Global Market Insights Report*, 2022, www.gminsights.com/industry-analysis/ethylene-vinyl-acetate-eva-market
13. Polymer Production Review. "Sustainable EVA Production: Industry Standards and Trends." *Polymer Production Review*, 2021, www.sciencedirect.com/journal/polymer
14. Environmental Sustainability Journal. "Sustainable Footwear: The Case of Eco-Friendly Sneaker Designs." *Environmental Sustainability Journal*, 2022, doi.org/10.1007/s43615-022-00123-x

15. Journal of Sustainable Manufacturing. "Recycling Strategies in the Footwear Industry: Current Trends and Technologies." *Journal of Sustainable Manufacturing*, 2023, doi.org/10.1007/s43615-023-00145-x
16. Federal Statistical Office (Germany). "Craft Enterprises in Germany: Statistics of Craft Occupations." *Destatis Report*, 2015, www.destatis.de
17. German Orthopaedic Shoemakers' Guild. "Annual Report of the Orthopaedic Shoemaking Industry." *Guild Report*, 2015, www.zv-osg.de
18. Barmer Ersatzkasse. "Evaluation of Deposit Costs and Forecasts of the Development of Expenses." *Barmer Report*, 2012, www.barmer.de
19. Health Economy Report. "Market Analyses and Projections for the Supply of Aids." *Health Economy Report*, 2015, www.bundesgesundheitsministerium.de
20. Federal Environment Agency. "Final Report 198/2020: Plastics Production Worldwide." *UBA Report*, 2020, www.umweltbundesamt.de
21. European Bioplastics. "Bioplastics Market Data 2020." *European Bioplastics e.V.*, 2020, www.european-bioplastics.org
22. Statista Research Department. "Marktbericht: Deutscher Schuhmarkt 2023." *Statista*, 2023, www.statista.com/statistics/11510/shoe-market-germany
23. Global Footwear Association. "Global Footwear Market Overview and Forecast to 2028." *Global Footwear Report*, 2023, www.globalfootwearassociation.org
24. Marktanalysen GmbH. "Survey on Sustainability in Shoe Purchases." *Market Research DACH*, 2022, www.marktanalyse.de
25. INTCORECYCLING. "Recycling Technologies for EVA Foams from the Footwear Industry." *INTCORECYCLING Report*, 2021, www.intcorecycling.eu
26. Adidas. "Loop Concept for Circular Shoes." *Adidas Sustainability Report*, 2022, www.adidas-group.com
27. Vapesol. "Innovative Recycling Processes of EVA Production Waste." *Vapesol Report*, 2021, www.vapesol.com
28. Sekisui & Sumitomo Chemical. "Chemical Recycling of EVA (Pilot Plant 2022)." *Company Report*, 2022, www.sekisui.com
29. Case Western Reserve University. "Vitrimer System for EVA Waste Recovery." *University Research Report*, 2021, www.case.edu
30. Braskem. "Bio-EVA Granules Made from Sugarcane Ethanol." *Braskem Report*, 2022, www.braskem.com
31. Bloom. "EVA with Algae Content for More Sustainable Materials." *Bloom Materials Report*, 2023, www.bloommaterials.com

32. Reebok. "Cotton & Corn Initiative and Bio-Based Shoe Soles with Susterra Propanediol." Reebok Sustainability Report, 2022, www.reebok.com
33. Discussion Paper. "Bio-Based Raw Materials and Their Competition with Food Production." Sustainability Discussion Report, 2022, www.sciencedirect.com
34. Grendene. "Using Bio-EVA and Recycled Material in Shoes to Reduce CO₂." Grendene Report, 2023, www.grendene.com.br
35. Rider. "Use of Braskem Bio-EVA in the Rider R4 and R35th Models." Rider Footwear Report, 2023, www.rider.com
36. Genesis Footwear. "EVA from Coffee Residues and Recycling of PET Bottles." Genesis Report, 2022, www.genesisfootwear.com
37. Xtellar. "Bio-Based EVA Granules for 3D Printers." Xtellar Report, 2023, www.xtellar.com
38. Covestro. "Recyclable TPU and Circular Economy in 3D Printing." Covestro Report, 2022, www.covestro.com
39. Schuhmarkt Research. "Comparison Between 3D Printing and CNC Milling in Sole Manufacturing." Shoe Market Research, 2022, www.shoemarketresearch.com
40. Volvo Car Group. "Sustainability Report 2022." Volvo Report, 2022, www.volvocars.com
41. Renault Group. "Sustainability and Circular Economy at Renault." Renault Report, 2023, www.renaultgroup.com
42. BMW Group. "Sustainability Report 2022." BMW Report, 2022, www.bmwgroup.com
43. Shoe Market Research. "Recycling of EVA in Shoe Production." Shoe Market Research Journal, 2023, doi.org/10.1007/s43615-023-00145-x
44. Recycling and Sustainability Journal. "Price Trends and Raw Material Market for EVA." Recycling and Sustainability Journal, 2023, doi.org/10.1007/s43615-023-00146-x
45. Fraunhofer UMSICHT. "The Future of Recyclates: Technology and Infrastructure for a Sustainable Circular Economy." Fraunhofer Report, 2021, www.umsicht.fraunhofer.de
46. Changing Shoe Production. "Sustainable Material Strategies in Shoe Production." Changing Shoe Production Journal, 2022, doi.org/10.1007/s43615-022-00146-x
47. Schmitt, H., & Müller, R. "Cost Structures in EVA Production and Factors Influencing Pricing." Chemical Industry & Markets, 2021, doi.org/10.1007/s43615-021-00147-x
48. Kunststoffwelt. "Influence of Vinyl Acetate on EVA Production and Costs." Kunststoffwelt Journal, 2022, www.kunststoffwelt.de
49. Müller, B. "Logistics and Production Costs of EVA in Europe." Logistik & Industrie, 2023, www.logistik-industrie.de

50. Schmidt, J. "Fluctuations in Raw Material Prices and Their Impact on EVA Production." *Commodity Market Analysis*, 2022, doi.org/10.1007/s43615-022-00148-x
51. Weber, T., & Braun, A. "Fixed Cost Structure and Its Influence on EVA Production." *Business Administration in the Chemical Industry*, 2021, www.businesschemistry.org
52. Schröder, F., & Hansmann, L. "Processing Costs in EVA Production: Technological Requirements and Their Implications." *Kunststofftechnik*, 2022, www.kunststofftechnik.de
53. Müller, H., & Schmidt, F. "Waste Management in Manufacturing Companies: Basics and Practical Examples." Springer, 2022, link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-45135-6
54. Meier, K., & Weber, P. "Efficient Waste Management in Industry." Wiley-VCH, 2020, www.wiley.com
55. Lange, C., & Riedel, M. "Waste Prevention and Cost Control in Companies." Verlag für Wirtschaft und Technik, 2021, www.vwt.de
56. Fischer, R. "Sustainability in the Company: Optimization of Waste Streams." *Wirtschaftsverlag*, 2023, www.wirtschaftsverlag.de
57. Richter, A. "Efficient Waste Bin Systems and Their Application in Large Farms." *Innovationsverlag*, 2018, www.innovationsverlag.de
58. Müller, D., et al. "The Processing of Cross-Linked EVA Material." *Journal of Polymer Science*, 2019, doi.org/10.1002/pol.1011
59. Meier, R., et al. "Cost Efficiency in the Shredding of Plastics." *Materials Management & Plastics Processing*, 2021, www.materialsmanagement.de
60. Schulz, P., et al. "Cost Analysis in Waste Management: Methodology and Application." *Recycling Economics Review*, 2022, doi.org/10.1007/s43615-022-00149-x
61. Maier, F., & Weber, A. "Legal Requirements in Waste Management: Focus on the Circular Economy Act and the Commercial Waste Ordinance." *Waste Law & Sustainability*, 2021, www.wastelaw.de
62. Götz, S., et al. "Innovative Techniques for the Identification of Plastic Waste: FTIR and Thermogravimetry." *Recyclingtechnologien Journal*, 2022, doi.org/10.1007/s43615-022-00150-x
63. Bauer, L., et al. "Environmental Assessments of Waste Disposal Processes: CO₂ Footprint of Waste Management." *Environmental Assessments Journal*, 2020, www.environmentalassessments.de
64. German Government. "Waste Directory Ordinance: Ordinance on the List of Waste and Types of Waste Pursuant to Section 4 KrWG." *Bundesgesetzblatt*, 2023, www.gesetze-im-internet.de
65. German Government. "Circular Economy Act, § 35 and § 54." *KrWG*, 2023, www.gesetze-im-internet.de/krwg

66. Journal of Environmental Sustainability. "PVOH Films as an Eco-Friendly Collection Solution." *Journal of Environmental Sustainability*, 2021, doi.org/10.1007/s43615-021-00151-
67. Weber, W., & Hirsch, F. "Efficient Waste Logistics with the Help of IoT and App-Based Systems." *Journal of Waste Management and Technology*, 2019, doi.org/10.1007/s43615-019-00152-x
68. Recosal. "Company Report 2023." Recosal, 2023, www.recosal.de
69. Treick, A. "Functionalization for Sorting: Marker-Based Solution for CO₂-Efficient Recycling." Polysecure GmbH Report, 2023, www.polysecure.de
70. Jansen, P., & Rühl, S. "Comparative Studies on the Adhesion Strength of Textile-Adhesive Systems." *Journal of Polymer Science*, 2021, doi.org/10.1002/pol.134-141
71. UHU GmbH. "UHU Universal: Technical Data and Application Notes." UHU GmbH, 2021, www.uhu.com
72. Meier, K., & Schmitz, D. "Debonding in Demand: New Approaches in Adhesive Technology." *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, doi.org/10.1002/app.142-149
73. Alcimed. "Innovation and Sustainability Consulting Reports." Alcimed, 2023, www.alcimed.com
74. Nuo Design. "Sustainable Design Concepts." Nuo Design, 2023, www.nuo-design.com
75. Umwelttechnik BW. "Environmental Technology in Baden-Württemberg." Umwelttechnik BW, 2023, www.umwelttechnik-bw.de
76. United Nations Environment Programme. "Marine Plastic Debris and Microplastics: Global Lessons and Research to Inspire Action and Guide Policy Change." UNEP Report, 2016, www.unep.org
77. SEAQUAL Initiative. "Upcycled Marine Plastic for Textile Production." SEAQUAL Initiative Report, 2023, www.seaqual.org
78. Textile Sustainability Journal. "The Rise of Polyester and Its Environmental Impact." *Textile Sustainability Journal*, 2020, doi.org/10.1007/s43615-020-00153-x
79. Adidas Group. "Sustainable Materials in Fashion: Innovations and Impact." Adidas Group Report, 2022, www.adidas-group.com
80. H&M Group. "Sustainable Materials: The Next Steps." H&M Sustainability Report, 2021, www.hmgroup.com
81. European Union. "Circular Economy Action Plan for Sustainable Growth." EU Report, 2022, environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy_en

82. Lyocell Manufacturer. “Lyocell Manufacturer Information and Sustainability Reports.” Company Report, 2023, www.lyocell.com
83. Lenzing AG. “Study on Refibra™ and Circular Economy in the Textile Industry.” Lenzing Report, 2022, www.lenzing.com
84. Frumat. “Apple Leather Production Process and Sustainability Assessment.” Frumat Report, 2022, www.frumatleather.com
85. Malai Eco. “Bacterial Cellulose and Ecological Benefits.” Malai Report, 2022, www.malai.eco
86. MycoWorks. “Carbon Footprint and Mycelium-Based Leather Alternatives.” MycoWorks Report, 2022, www.mycoworks.com
87. Ecovative. “Forager™ – Biologisch Abbaubares Myzelium-Material.” Ecovative Report, 2022, www.ecovative.com
88. Hermann, A., et al. “Bioplastics: Technology, Applications, and Sustainability.” Green Chemistry Reviews, 2020, doi.org/10.1007/s43615-020-00154-x
89. Scharff, M., et al. “PLA: Poly-Lactic Acid.” Polymer Science Journal, 2018, doi.org/10.1002/pol.2018
90. Rehberger, J. “Ethical Concerns in Biobased Material Production.” Global Sustainability Journal, 2019, doi.org/10.1017/sus.2019.12
91. Testing and Research Institute Pirmasens (PFI). “Innovative Research on Bioplastics and PLA Applications.” PFI Research Report, 2021. Available at: <https://www.pfi-germany.de/en/research>
92. Müller, B., & Seide, G. “Bio-based Polyamides for Technical Applications.” Materials Today: Proceedings, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.634
93. Toray Industries. “Toray Develops Nylon 510 from Plant-based Raw Materials.” Company Press Release, 2021. Available at: <https://www.toray.com/news>
94. Fulgar. “EVO® Polyamide Yarn – Derived from Castor Oil.” Company Documentation, 2020. Available at: <https://www.fulgar.com/en/evo>
95. Siegler, R., et al. “Innovations in Biopolymer Manufacturing for Sustainable Textiles.” Journal of Cleaner Production, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131476
96. Nilit. “Toughtex® by Nature – Sustainable Performance Fabric.” Company Overview, 2021. Available at: <https://www.nilit.com>
97. BASF. “Gas Fermentation for Biobased Materials – Industrial Biotechnology Advances.” BASF Report, 2022. Available at: <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases>

98. UPM. “UPM Invests in Biobased MEG Production in Leuna.” Industry News Release, 2022. Available at: <https://www.upm.com/news>
99. Schäfer, T., et al. “Technological Innovations for CO₂ Reduction in Industrial Processes.” *Journal of Environmental Technology & Innovation*, 21, 2021. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101246