

ABSCHLUSSBERICHT

Projekt SepCoTex





Abschlussbericht:

**Entwicklung eines Verfahrens
zur Separation von Coatings und Textilien
zur Wiederverwertung der Basisrohstoffe
(SepCoTex)**

Projektlaufzeit: 30.11.2022 – 31.05.2025

Das Entwicklungsprojekt wurde
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
unter dem AZ: 38231/01 gefördert.

Verfasser:

Jannic Binder (Fa. Seiz),
Olaf Thannheiser (Fa. Barthmann Recycling),
Nadine Brandt (Hochschule Hof)
Alexandra Luft (Hochschule Hof)

Metzingen, August 2025

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	II
Zusammenfassung	1
Einleitung	2
Vorhabendurchführung und -ergebnisse.....	6
Arbeitsschritte, Methoden und Ergebnisse	6
Arbeitspaket 1: Laufende Recherche und Marktbeobachtung.....	6
Arbeitspaket 2: Definition der Produkt- und Sortiervorgaben	10
Arbeitspaket 4: Charakterisierung Ausgangs- und Entstehungsprodukte.....	16
Arbeitspaket 3: Versuche zur Prozessentwicklung.....	17
Arbeitspaket 5: Demonstratorversuche.....	32
Arbeitspaket 6: Berichtswesen und Projektleitung	36
Ergebnisdiskussion und Abweichungen von der Zielsetzung	37
Bewertung im Vergleich mit Stand der Technik	39
Verbreitung der Vorhabenergebnisse	40
Fazit	41
Literaturverzeichnis	42
Abbildungsverzeichnis.....	44
Tabellenverzeichnis	45

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Definition	Einheit
EL	Elastan (Textilkurzzeichen), Markenname: Spandex	--
NBR	Nitril-Butadien-Kautschuk	--
PA	Polyamid (Textilkurzzeichen)	--
PA6	Polyamid mit Polymerbildung durch Polymerisation	--
PA6.6	Polyamid mit Polymerbildung durch Polykondensation	--
PE	Polyethylen (Textilkurzzeichen)	--
PER	Perchlorethylen, ein stark fettlösendes Mittel gegen Fett und Schmutz auf Textilien ohne Angreifen der Fasern	--
PES	Polyester (Textilkurzzeichen)	--
PET	Polyethylenterephthalat, hergestellt durch Polykondensation, aus der Familie der Polyester	--
PP	Polypropylen (Textilkurzzeichen)	--
PSA	Persönliche Schutzausrüstung	--
PVC	Polyvinylchlorid	--
Garnfeinheit bzw. Titer	Feinheit von Garnen, ausgedrückt als Verhältnis von Gewicht zu Länge. Hier verwendet: Gewichtsnummerierung in tex/dtex (feste Länge, Gewicht variabel): 1 tex = 1 g Garn pro 1000 m Lauflänge. 1 dtex = 1 g Garn pro 10.000 m Lauflänge. Je niedriger die Gewichtsnummer, desto feiner das Garn.	tex, dtex
Strickfeinheit bzw. Gauge	Feinheit von Gestriken, gemessen am technischen Merkmal der Teilung (englisch „Gauge“), d. h. Anzahl der Stricknadeln auf 1 Zoll (2,54 cm) des Maschinenumfangs. Bsp.: E20 = 20 Nadeln arbeiten pro Zoll. Je mehr Nadeln/Zoll arbeiten, desto feiner das Gestrick.	E (Nadeln/ Zoll)

Zusammenfassung

Dieser Abschlussbericht widmet sich den Entwicklungsarbeiten und Ergebnissen, die im Rahmen einer Verfahrensentwicklung zur Separation von Coatings und Textilien mit dem Ziel der Wiederverwertung von dessen Basisrohstoffen entstanden sind.

Das Entwicklungsprojekt verfolgte das Ziel, Beschichtungen von Textilien – explizit von Arbeitsschutzhandschuhen aus Polyamid (PA) mit einer Beschichtung aus Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR) – von deren Untergrund zu separieren, um die getrennten Einzelbestandteile wieder in den Rohstoffkreislauf zurückzuführen. Hierzu wurde ein mehrstufiges, mechanisches Recyclingverfahren erprobt und bewertet. Angestrebt wurde ein Verfahren, bei dem aus den rezyklierten Rohstoffen wieder ein neues Textil (Arbeitsschutzhandschuh) herstellbar ist. Alternativ sollte das Rezyklat zumindest für den Spritzguss tauglich sein. Konkret wurde das Alttextil sortiert und gewaschen, geschreddert, schneidgemahlen, kryogen prallstromgemahlen, gesiebt und granuliert. Laboruntersuchungen, welche parallel zu den einzelnen Verfahrensschritten zur Qualitätseinschätzung durchgeführt wurden, ergaben, dass das Ausgangstextil aus mehr als zwei Komponenten besteht. So war zusätzlich zum Polyamid-Strickgrund mit NBR-Beschichtung der Handinnenfläche noch Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) als Farbmarkierung im Bündchen enthalten, sowie Elasthan im Gummizug und Acrylate als Aufdruck auf dem Handschuhrücken. Diese zusätzlichen Komponenten erschwerten die Separation der Einzelbestandteile über mechanische Trennverfahren. Dennoch konnte zum Projektende ein Granulat aus Polyamid mit 20 % Störstoffgehalt im Vergleich zum Ausgangswert von 55 % erzeugt werden. Es wird empfohlen, den Ausgangsgehalt an Störstoffen (EL, PP, PE und sonstige) bereits über das Produktdesign und bei der Herstellung der Arbeitsschutzhandschuhe zu senken, um das Produkt besser in seine Bestandteile zerlegen zu können. Dies kann bspw. durch den Verzicht auf ein zusätzliches Material für das Bündchen erreicht werden.

Dieses Forschungsprojekt wurde in Zusammenarbeit mit folgenden Partnern durchgeführt:

- Friedrich Seiz GmbH, 72555 Metzingen
- Barthmann Kunststoff Recycling GmbH, 95632 Wunsiedel
- Daimler Truck AG, 76742 Wörth
- Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hof, IFM, 95213 Münchberg

Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt hat dieses Entwicklungsprojekt unter dem AZ: 38231/01 gefördert. Der Abschlussbericht kann über die DBU bezogen werden und ist über deren Website auch als Onlineveröffentlichung verfügbar.

Einleitung

Das Forschungsprojekt hatte die Entwicklung eines Verfahrens zur Trennung von Beschichtungen und Textilien zum Ziel. Speziell ging es um persönliche Schutzausrüstung (PSA) in Form von Post-Consumer-Arbeitsschutzhandschuhen aus Polyamid (PA) mit Nitril-Butadien-Kautschuk-Beschichtung, die weltweit in sehr großen Stückzahlen zum Einsatz kommen. Angestrebt wurde eine Umweltentlastung über Rückführung recycelbarer Wertstoffe, reduzierter Rohstoffverbrauch und Energieeinsparung.

Das Marktvolumen von Arbeitsschutzhandschuhen im Jahr 2020 entsprach 6,8 Mrd. Paar Handschuhe. Deren Aufbau reicht von dünnem Kunststoff bis zu aufwändigen Feuerwehrschutzhandschuhen. Hochwertige Schutzhandschuhe sind mehrlagige textile, oft beschichtete, Handschuhe (z. B. aus PA oder PES), die auch Schnittschutzkomponenten enthalten können. Die Beschichtungen bestehen meist aus Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR), Polyurethan (PU) oder Polyvinylchlorid (PVC). 2020 wurden allein in Deutschland ca. 164 Mio. Paar textile Schutzhandschuhe verbraucht. (macrom Marketingresearch & Consult 2021) Bei einem Durchschnittsgewicht von 50 g/Paar bei den im Projekt betrachteten Handschuhen wurde eine Menge von 8.200 t gemischter, beschichteter textiler Abfälle in der Müllverbrennung entsorgt.

Bei der Firma Daimler Truck AG werden pro Jahr rund 5,8 Mio. Paar beschichtete Arbeitsschutzhandschuhe verbraucht (entspricht ca. 290 t Abfall). Der Gesamtmarkt der relevanten beschichteten PSA-Handschuhe betrug im Jahr 2020 ca. 124 Mio. Paare und damit eine Gesamtmenge von ca. 6.200 t in Deutschland. Bisher kann die Ressourcenschonung bei Arbeitsschutzhandschuhen nur durch Waschen der Handschuhe erfolgen. Abbildung 1 führt eine Soll-Ist-Darstellung der Kreislaufwirtschaft zu Projektbeginn auf.

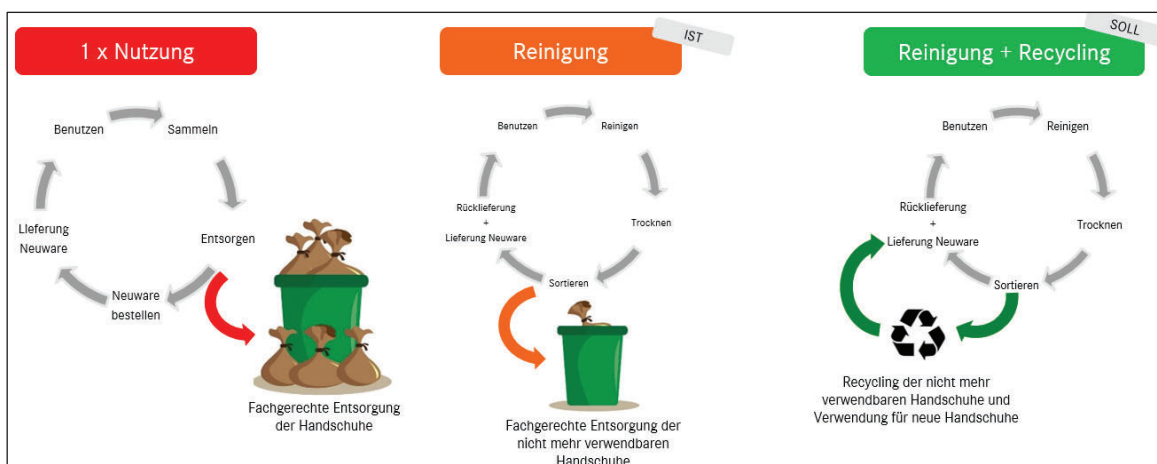


Abbildung 1: Geschlossene Kreislaufwirtschaft Soll-Ist-Vergleich (Grafik: vecteezy, Daimler Truck AG)

Die beschichteten Handschuhe werden bisher am Gebrauchsende von Fa. Daimler, und wenn sie nicht mehr durch Waschverfahren wiederinstandgesetzt werden können auch bei Fa. Seiz, der Müllverbrennung zugeführt. Bei Fa. Seiz beträgt der Entsorgungsanteil aussortierter Handschuhe ca. 35 t (entspricht 7 % von 500 t Reinigungsware).

Nach aktuellem Stand der Technik werden unbeschichtete Textilien aufgerissen und tlw. in Abmischungen mit Neufasern in Vliesstoffen für den nicht sichtbaren Bereich im Automobil, als Putzlappen, Füllstoffe und in weiteren Anwendungen eingesetzt. Nach Auskunft von Textilrecyclern und Rechercheergebnissen können beschichtete Textilien nicht recycelt werden, sondern werden i. d. R. thermisch verwertet. (RVN Faserproduktions GmbH, 95339 Neuenmarkt 2022) Die Beschichtungen sind mit bestehender Prozesstechnik nicht von den Textilien trennbar. Die hohen, zum Zerreißen der Verbundwerkstoffe erforderlichen, Zugkräfte führen z. T. zur Schädigung der Anlagentechnik. Alternative Techniken für werkstoffliches Recyceln von Verbundtextilien sind derzeit nicht verfügbar oder noch nicht für das Textilrecyclen getestet.

Als Kombination von mindestens zwei Werkstoffen, die sich in ihren Eigenschaften unterscheiden – PA6.6 (Nylon) und NBR – sind Arbeitsschutzhandschuhe ein Verbundwerkstoff.

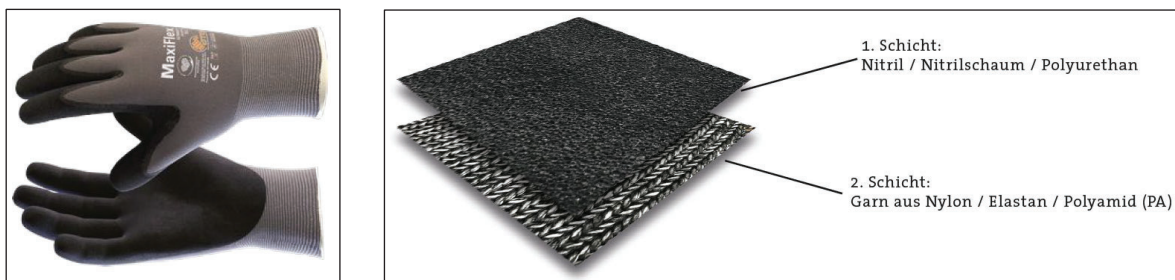


Abbildung 2: Zusammensetzung eines Montagehandschuhs von Seiz (Seiz Industriegeschützhandschuhe GmbH 2021)

Der Nylon-Bestandteil ist ein linear aufgebautes Polyamid aus der Gruppe der Copolymere (RCT Reichelt Chemietechnik GmbH + Co. 09.06.2022b), welches nach dem Schmelzen zu Endlosfasern (Filamenten) ausgesponnen werden kann und bei Arbeitsschutzhandschuhen zur textilen Fläche verstrickt wird. Der Synthesekautschuk für die Handschuhbeschichtung ist das Co-Polymerisat von Acrylnitril und 3-Butadien, einem zweifach ungesättigten Kohlenwasserstoff (RCT Reichelt Chemietechnik GmbH + Co. 09.06.2022a), und wird zum Erreichen von Chemikalienfestigkeit auf die Arbeitsschutzhandschuhen aufgebracht (vgl. Abbildung 2). Arbeitsschutzhandschuhe durchlaufen textile Herstellungsverfahren wie stricken, beschichten/dippen und bedrucken. Textilrecycling kann bereits bei der Textilherstellung ansetzen, wobei Verschnitt und Ausgangsmaterialien größtenteils sortenrein getrennt und wiederverwertet werden können. Mit Zunahme der Produktionsschritte, bzw. Hinzukommen von Komponenten

in das textile Endprodukt (Garne, Verschlüsse, Beschichtungen, Etiketten etc.), steigt die Komplexität von Trenn- und Aufbereitungsverfahren. Nach Ende der Nutzungszeit des Textils kommen Beschädigungen und Verschmutzungen hinzu. Im Bereich der Bekleidungs- und Haustextilien fielen lt. einer Studie aus dem Jahr 2018 bereits 1,31 Mio. Tonnen Alttextilien an, von denen die meisten als Altkleider wiederverwendet, zu Putzlappen verarbeitet oder der Reißspinnstoffindustrie (für Vliese und Dämmstoffe) zugeführt wurden (s. Abbildung 3). In der Reißerei wird sortenreines Material gebraucht, das wieder verspinnbar ist. Schreddern ist als Recycling-Methode für sortenreine und -unreine Textilien geeignet, aber sehr belastend für die Faser (Verkürzungen, Materialverlust). Es kommt dennoch für Polyamid als Schmelzspinn garn infrage.

In der Berufsbekleidungsbranche wird versucht, die Herstellung der Arbeitskleidung ressourcenschonend und mit kurzen Lieferwegen zu betreiben, oder Rezyklate einzusetzen. Recyclingfirmen sammeln Berufsbekleidung und -schuhe, welche zum einen Verschmutzungen durch Öl und Chemikalien enthalten können, und zum anderen oft Mischabfälle aus Natur- und Kunststofffasern sowie Gummi sind. Ar-

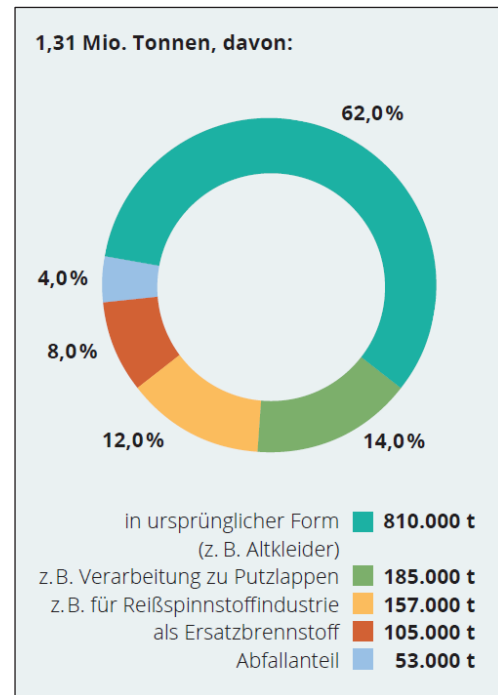


Abbildung 3: Verwertungspotential von Bekleidungs- und Haustextilien nach (2)



Abbildung 4: verschmutzte Handschuhe bei Seiz

beitsschutzhandschuhe mit NBR-Beschichtung werden derzeit einer Wiederverwendung nach Wiederaufbereitung durch Waschen zugeführt (vgl. Abbildung 4). (Libra Industries of Michigan, Inc. 09.06.2022) Dies verringert Abfallentstehung, kann die Arbeitsschutzhandschuhe im Fall von Beschädigungen jedoch nicht vor thermischer Verwertung bewahren, da keine passenden Trennverfahren für PA/NBR-Verbunde bekannt sind. Neben der Zusammensetzung des zu verwertenden Abfallguts spielen auch die Grenzflächen der Stoffe eine Rolle beim Recycling. Bei

Arbeitsschutzhandschuhen geht eine geschlossene Schicht (NBR-Beschichtung) eine dauerhafte, reibschlüssige Verbindung mit einem offenporigen, unebenen Untergrund (PA-Gestrick) ein. Wie am Bsp. eines geschredderten Montagehandschuhs in Abbildung 5 ersichtlich, ist das erhaltene Schreddergut farblich unterscheidbar. Ein optisches Sortiersystem ist dennoch nicht empfehlenswert, da Vorder- und Rückseite eines Schredderstücks differieren. Nach der Zerkleinerung sollte dennoch eine Sortierung in Fraktionen aus reinem Polyamid und in NBR erfolgen. Um den textilen Untergrund von der Beschichtung zu lösen kann Kryogenvermahlung eingesetzt werden. Dieses Verfahren wird derzeit nicht zum Textilrecycling



Abbildung 5: Handschuh schneidgemahlen auf ca. 8 bis 10 mm

eingesetzt, eignet sich aber für elastische, zähe und temperaturempfindliche Materialien (z. B. Kautschuk, Kunststoffe, Polyurethane). Die Verwendung von Flüssigstickstoff führt dabei zu einer Materialversprödung und damit zur Verbesserung des Bruchverhaltens. (RETSCH GmbH 08.06.2022; Aufbereitungstechnologie NOLL GmbH 2016) Die Erhöhung der Brüchigkeit geht mit einem Anstieg des Ablösungsvermögens elastischer Materialien von Untergründen einher. Bei faserigen Produkten ist prozessbedingt mit Faserverkürzung zu rechnen. Dies kann bei Polyamid jedoch vernachlässigt werden, da das entstehendes Rezyklat durch Schmelzspinnprozesse wiederaufbereitet werden muss, um es erneut als Filament für Garne zu verwenden.

Dem Mahlprozess muss ein Separationsprozess nachgeschaltet werden, um eine Trennung von PA und NBR zu ermöglichen. Sieben stellt die vom Energieverbrauch her einfachste Form der Trennung dar. Entscheidend ist, welche Form und Dimension die entstehenden Partikel haben und ob Dichteunterschiede die Trennung vereinfachen (im Falle von PA und NBR ist letzteres nicht der Fall). Entsprechend dem Stand der Technik wurde zur Umsetzung des Forschungsvorhabens ein mehrstufiges Recyclingverfahren zum Trennen der Wertstoffe, die in den Schutzhandschuhen enthalten sind, entwickelt (s. Prozessschritte in Abbildung 6).

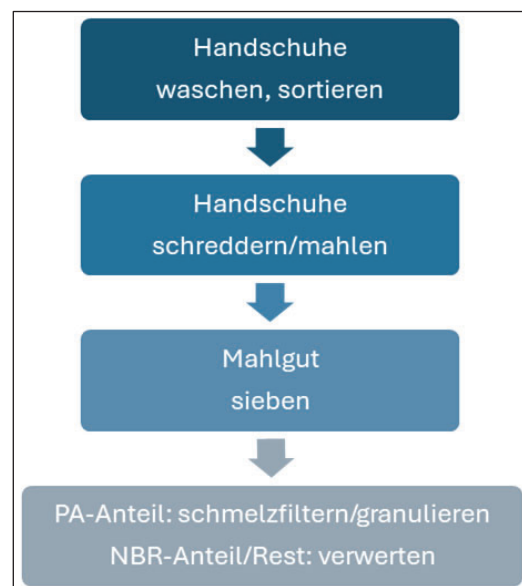


Abbildung 6: Schritte Recyclingverfahren

Vorhabendurchführung und -ergebnisse

Arbeitsschritte, Methoden und Ergebnisse

Die Entwicklung eines Verfahrens zur Separation von Coatings und Textilien wurde in mehrere Arbeitspakete aufgeteilt, welche im Folgenden näher erläutert werden. Soll-Vorgaben vor Projektbeginn werden mit Ergebnissen während der Projektlaufzeit abgeglichen.

Arbeitspaket 1: Laufende Recherche und Marktbeobachtung

Arbeitspaket (AP) 1: Dauer: 24 Monate (Monat 1 – Monat 24)	
Beteiligte Verantwortlichkeit	Verantwortlich für die Durchführung: HSH Unterstützend tätig: Seiz, Barthmann
Ziele des Arbeitspakets	• Recherche zum Stand der Technik, Grundlagen und Einflussgrößen • Umfassende Recherche von Schutzrechten
Inhalte und Aufgaben des Arbeitspakets	• In diesem Rahmen sind weiterführende Recherchen zum Stand der Technik, Grundlagen und Einflussgrößen notwendig, um vorhandene Informationen für die Forschungsarbeit aufzugreifen und zu verarbeiten. • Durch eine umfassende werden Recherche etwaige Verletzungen von Schutzrechten, welche nach Antragstellung angemeldet wurden, ausgeschlossen. • Jeder Partner führt die Recherchen und Auswertungen entsprechend seines Teilprojekts durch. • Die ermittelten Informationen werden aufbereitet, allen Partnern zur Verfügung gestellt und diskutiert, um daraus den Einfluss auf die jeweils eigenen Forschungsarbeiten abzuleiten.

Im Berichtszeitraum wurden laufende Recherchen zum Stand der Technik durchgeführt. Dies umschloss Inhalte und Ergebnisse von Recycling-Projekten anderer Unternehmen, sowie das Auffinden und Bewerten von Prozessen, welche Relevanz für die Aufbereitung der PA/NBR-Handschuhe haben könnten.

Während der Recherchen konnten keine Prozesse für mechanisches Textilrecycling gefunden werden, welche über das Herstellen von Reißfasern zur Herstellung von Rezyklatgarnen mit schlechteren Eigenschaften als das Ausgangsmaterial hinausgehen. Auf chemischer Seite gibt es Ansätze, Textilien mit Elastan- und Polyamidgehalt mit einem selektiven Lösungsmittel zu behandeln. Dieses löst das Elastan aus und lässt sich bis fast 99 % zurückgewinnen, ohne als „besonders besorgniserregender Stoff“ auf der REACH-Liste eingestuft zu sein. (Pruckner 2022) Als ein Beispiel für mechanische Trennverfahren wurde die Fa. Wanrooetech, ein chinesischer Hersteller von Granulierern, Pelletierern, Schredder-, Brecher- und Zerkleinerungsmaschinen mit Fokus auf Kunststoffrecycling gefunden. Die Materialien können auch Fasern

enthalten und bspw. in Bändchenform zugeführt werden. Die Separation findet mittels Windsichten statt, je nach Maschinenmodell können auch Rüttelplatten mit Lochblechen zur Materialtrennung vorhanden sein.

BASF hat ein Verfahren zum Alttextilrecycling für polyamidbasierte Kleidung (Funktionsbekleidung, Outdoor- und Sportbekleidung) erschlossen, das sowohl Post-Consumer- als auch Industrieabfälle (Verschnitt) verarbeitet. Das sog. Loopamid®-Recyclingverfahren wirbt damit, auch Materialmischungen (z. B. Elasthan) zu tolerieren. Die Prozessschritte beinhalten: Schreddern der Textilien, Depolymerisation, Reinigung, Polymerisierung und Ausspinnen des Polyamids. Schritte zur Trennung oder Sortierung der Fremdbestandteile sind nicht beschrieben. (BASF SE) In Zusammenarbeit mit der Fa. Inditex wurde zudem ein Demonstratorprodukt (Jacke) gefertigt, deren Komponenten (Stoff, Knöpfe, Füllung, Klett- und Reißverschluss) aus Loopamid® bestehen. Dieses Ein-Komponenten-Produkt soll künftiges Recycling zusätzlich erleichtern. Übertragen auf das im Entwicklungsprojekt bearbeitete Produkt ist auch dort eine Ein-Komponenten-Zusammensetzung erstrebenswert.

Am Forschungsinstitut für Textilchemie und Textilphysik der Universität Innsbruck hat Forschung zur chemischen Trennung und Rückgewinnung von PA aus Textilien im Labormaßstab betrieben. Hierbei wird das PA selektiv mit einem Lösungsmittel (Calciumchlorid, Ethanol und Wasser) aufgelöst und anschließend wieder ausgefällt. PA-Zumischfasern wie Wolle, Zellulose, Polyester oder Elastan können ebenso wiederverwendet werden. Es war dabei kein Unterschied im Polymerisationsgrad des PA vor bzw. nach der Auflösung/Wiederausfällung erkennbar. Forschungsaktivitäten laufen zu Fasermischungen von PA/Cellulose und PA/Elastan. Mit dem Verfahren ist eine Rückgewinnung von PA zu ca. 80 bis 90 % möglich. Die Effizienz der PA-Auflösung wird dabei nicht durch Elastan beeinflusst. (Manian, Bechthold, Pham 2023)

Die TU Chemnitz hat in Zusammenarbeit mit der Fa. ERMAFA Sondermaschinen- und Anlagenbau GmbH eine Pilotanlage entwickelt, mit der Elastomere durch Warmmahltechnologie recycelt werden können. (Hoyer 14.03.2014) Beim Warmmahlverfahren wird die Zerkleinerungswirkung durch Einleitung hoher Druck- und Schubbeanspruchungen in das Elastomer erreicht. Dadurch kommt es zu Werkstoffermüdung und -versagen sowie zum Ausreißen feiner Partikel. Bei dem Verfahren wird bei



Abbildung 7: NBR-Reststoff vor (li.) und nach (re.) Verarbeitung im Warmmahlextruder (Quelle: TU Chemnitz, 2014)

Umgebungstemperatur oder darüber hinaus gearbeitet (Warmmahlen), wodurch auch viel Abwärme erzeugt wird, was eine intensive Kühlung bedingt. Eigenschaften so hergestellter Rezyklate sind eine zerklüftete Oberfläche und eine zerrüttete Struktur. Das Verfahren eignet sich auch für Nitrilkautschuk (NBR), wobei in Versuchen auf einer Pilotanlage der TU Chemnitz ein feinteiliges, sieb- und rieselfähiges Produkt erzeugt werden konnte (vgl. Abbildung 7). Es

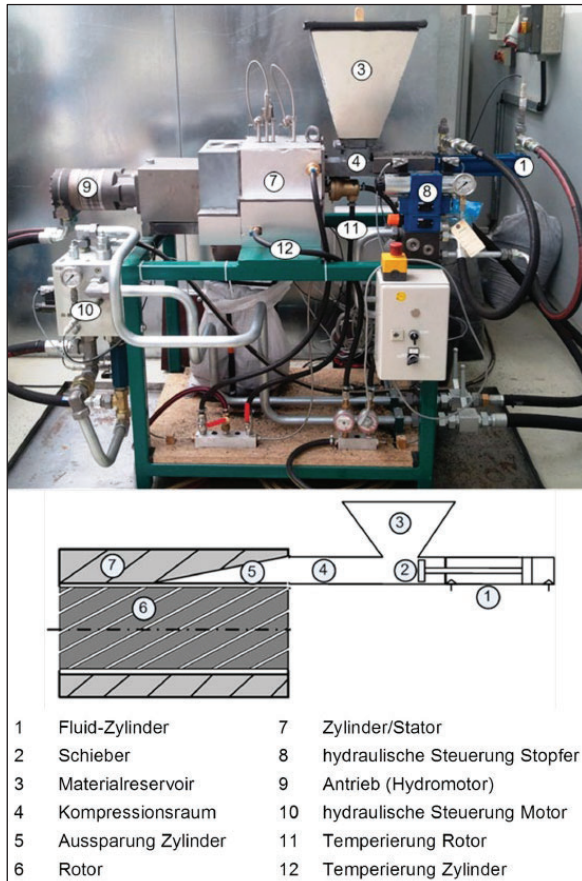


Abbildung 8: Warmmahl-Pilotanlage (Quelle: TU Chemnitz, 2014)

ist nicht bekannt, ob eine Pilotanlage dieser Art sich auch für die Zerkleinerung von NBR eignen würde, wenn dieses als Beschichtung auf einem Textilgrund aufgebracht ist. Von Interesse ist jedoch die Zusammensetzung der Anlage, welche statt einer konventionellen Förderschnecke in der Einzugszone eine Stopfvorrichtung (Fluidzylinder mit Schieber) aufweist. Dies führt dazu, dass die Verarbeitungs- bzw. Maschinentemperatur sowie die Schneckendrehzahl keinen Einfluss auf den Aufbau von Massedruck nehmen (s. Abbildung 8). Eine derartige Konstruktion könnte von Vorteil sein, um das im Projekt verarbeitete Gemisch bei Kryogenvermahlung in der Versuchsanlage der Fa. Noll besser zu transportieren.

Sonstige Recherchen zum Stand der Technik im Textilrecycling bestätigten die derzeit vorherrschende Nutzung mechanischer Pro-

zesse, der vor allem das Auskämmen der Ware als wichtiges Kriterium in den Fokus setzt. Dabei werden jedoch nicht explizit Funktions- sondern Haushaltstextilien berücksichtigt und der Fokus auf das Auskämmen von Kurzfasern gelegt. (Andritz AG 2024) Für das Forschungsprojekt wurden Kämmprozesse zur Beseitigung von Störstoffen (Beschichtung) in Kombination mit einem Siebprozess fokussiert (s. Ausführungen zu AP 3 und 4).

Zur Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference 2024 in Stuttgart sind Forschungsergebnisse des ebenfalls vom DBU geförderten Projektes „TexKreis“ veröffentlicht worden. Das Projekt des Instituts für Kunststoff- und Kreislauftechnik (IKK) der Leibniz

Universität Hannover betrachtete thermoplastische Textilabfälle aus Polyester und dessen Mischungen (z. B. PET/EL, PA/EL, TPU/PET). Ähnlich zum Projekt „SepCoTex“ wurde bei „Tex-Kreis“ ein mechanischer Ansatz zum Recycling textiler Abfälle (u. a. Produktionsreste aus der Bekleidungsindustrie) verfolgt. Textilabfälle wurden gesammelt, sortiert, geschreddert/schneidgemahlen, pelletiert, getrocknet und einem Extruder zugeführt. Im zuletzt genannten Schritt wurde die Materialzusammensetzung angepasst, um ein Rezyklat zu erhalten, das für Spritzgussanwendungen geeignet ist. Dies erfolgte mittels Schmelzfilterung und Zugabe von Spülgasen zur Entfernung flüchtiger Substanzen. Es wurde zuvor keine Trennung der Bestandteile von Textilmischungen (bspw. bei PES/EL) vorgenommen und ein Festigkeitsverlust von ca. 32 % festgestellt, wenn EL enthalten war. (Pogrzeba 21.11.2024) Als problematische Komponenten wurden auch die Farb- und Füllstoffe genannt, sowie ihre Zersetzungsprodukte. Es wurde vom IKK darauf verwiesen, dass sich Polymere für Spritzguss von denen für Textilanwendungen in ihren Eigenschaften unterscheiden und daher nicht 1:1 gegeneinander austauschbar sind. Laut ersten Forschungsergebnissen konnten, gemessen an Viskosität und mechanischen Kennwerten, qualitativ hochwertige Rezyklate am IKK erzeugt werden. Ein Fiber-to-Fiber-Recycling wurde in „TexKreis“ bisher nicht erreicht und Nachhaltigkeitsbetrachtungen stehen noch aus. (Plastverarbeiter.de 2024)

Während der Projektlaufzeit wurden keine Schutzrechte gefunden, welche der Entwicklung eines mechanischen Verfahrens zum Recycling beschichteter Textilien entgegenstehen.

Im Rahmen der Besprechungen innerhalb des „SepCoTex“-Projektkonsortiums, bzw. mit Unterauftragnehmern zur Verbesserung des Recyclingprozesses, wurde ein mehrstufiges Recycling in den Fokus genommen, das aus mehreren Siebverfahren zur Trennung der Rohstoffe besteht. Auch die Fertigung der Handschuhe aus so wenig Grundbestandteilen wie möglich (zur Erleichterung der Trennung) sollte angestrebt werden.

Arbeitspaket 2: Definition der Produkt- und Sortiervorgaben

Arbeitspaket (AP) 2: Dauer: 5 Monate (Monat 1 – Monat 5)	
Beteiligte Verantwortlichkeit	Verantwortlich für die Durchführung: Seiz Unterstützend tätig: HSH, Daimler, Barthmann
Ziele des Arbeitspakets	Im Rahmen des Arbeitspaketes sollen die Anforderungsprofile und Abläufe auf Basis der Prozessschritte, Materialbasis, Zielsetzungen und weitere Vorgaben erarbeitet werden.
Inhalte und Aufgaben des Arbeitspakets	• Erarbeitung der Vorgaben, die bei der Materialbereitstellung, Sortierung und Reinigung, sowie der Aufbereitung der Handschuhe zu berücksichtigen sind. • Prüfplanung für die Charakterisierung der Zwischenprodukte und Produkte (recyceltes Material) • Hochrechnung von Kosten-Nutzen + CO₂-Abdruck durchführen.

Um Sortiervorgaben und Prozesswege für das Recycling zu definieren, wurde eine Analyse des Produktportfolios beim Schutzhandschuhhersteller Seiz durchgeführt. Es wurden Anforderungsprofile für die verschiedenen Prozessstufen festgelegt, die Sortiervorgaben für die Handschuhe abgeleitet, die Prüfplanung für die Charakterisierung des recycelten Materials festgelegt und die Hochrechnung der Kosten-Nutzen-Daten und des CO₂-Abdrucks vorgenommen.

AP 2: Vorgaben zur Materialbereitstellung, Sortierung und Reinigung

Anforderungsprofil des Montagehandschuhs mit NBR-Beschichtung

Der Handschuh ist ein nahtlos gestrickter Schutzhandschuh, der auf einem feinen Trägergewebe aus Nylon in Kombination mit einem elastischen Anteil wie Elastan im Bündchen basiert. Dieses PA-Trägermaterial weist eine Feinheit von etwa 15 bis 18 Gauge auf, was eine sehr hohe Passformgenauigkeit sowie ein gutes Tastgefühl ermöglicht. Durch das nahtlose Strickverfahren wird eine ergonomische Passform erzeugt, die sich der natürlichen Ruhehaltung der Hand anpasst.

Die Innenhand und Fingerkuppen sind mit einem Mikroschaum aus Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR) beschichtet. Diese Beschichtung ist atmungsaktiv und zeichnet sich durch eine sogenannte Micro-Cup-Oberflächenstruktur aus, die für einen gezielten und sicheren Griff bei feinmotorischen Tätigkeiten sorgt, insbesondere unter trockenen Arbeitsbedingungen.

Zusätzlich ist der Handschuh silikonfrei gefertigt und enthält nur hautfreundliche, nach dermatologischen Standards geprüfte, Inhaltsstoffe. Er erfüllt relevante Anforderungen der REACH-Verordnung und ist gemäß Oeko-Tex Standard 100 zertifiziert. Dieses Modell ist Touchscreen-

fähig, was eine Bedienung von elektronischen Geräten ermöglicht. Es ist außerdem für den direkten Kontakt mit Lebensmitteln zugelassen und erfüllt entsprechende europäische und internationale Normen.

Insgesamt kombiniert der Handschuh eine feine, ergonomisch optimierte Textilbasis mit einer hochfunktionalen Beschichtung, die sowohl taktile Präzision als auch mechanischen Schutz bei gleichzeitigem Tragekomfort gewährleistet. Damit eignet er sich besonders für präzise Tätigkeiten in trockenen Einsatzbereichen, wie sie bspw. in der Montage, Logistik oder Qualitätskontrolle vorkommen.

Sortiervorschrift Daimler Truck AG

- Daimler Truck AG (Daimlerstr. 1, 76744 Wörth am Rhein, Rheinland-Pfalz)
- Daimler Truck AG (Hauptstraße 107, 76571 Gaggenau, Rheinland-Pfalz)

Sortiervorgaben Daimler Truck AG in Wörth am Rhein und Gaggenau

Definition der zu sammelnden Handschuhe:

Zu sammeln sind alle Handschuhe, welche ausschließlich aus den folgenden Materialien bestehen:

- Nylon
- Spandex
- Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR) (Beschichtung)
- Wasserbasiertes Polyurethan (Beschichtung) à Anteil weniger als 5%

Sortiervorgaben

Die freigegebenen Handschuhe werden in Boxen gesammelt und sortenrein für den Transport in die Wäscherei vorbereitet (vgl. Bilder im Anhang). Die Waschanleitung ist separat im Dokument „Waschanleitung Daimler Truck AG“ dokumentiert.

Sammlung der gewaschenen Handschuhe bei der Daimler Truck AG

Nach der Wäsche wurden die zu entsorgenden Handschuhe bei der Wäscherei gesammelt und der Daimler Truck AG zur Verfügung gestellt. Nach einer Menge von ca. 500 kg wurden die gewaschenen Handschuhe von Seiz im Daimler Truck AG Werk in Wörth abgeholt. Die Sammlung bis zu einer Testmenge von ca. 1.000 kg erfolgte bei Seiz Industriehandschuhe GmbH in Metzingen/Glems.



Abbildung 9: Ausgabe- und Sammelstellen von Montagehandschuhen bei Fa. Daimler

Waschanleitung Daimler Truck AG

Daimler Truck AG (Daimlerstr. 1, 76744 Wörth am Rhein, Rheinland-Pfalz)

Daimler Truck AG (Hauptstraße 107, 76571 Gaggenau, Rheinland-Pfalz)

Im Folgenden wird die Waschanleitung für die standardmäßige Wäsche der Handschuhe beschrieben. Im späteren Verlauf werden noch weitere spezielle Waschverfahren geprüft und angewendet.

Definition des Standardwaschvorgangs

Die in der Sortiervorschrift beschriebenen Artikel werden folgendermaßen sicher gewaschen:

1. Es wird ein für die professionelle Reinigung von Industriehandschuhen entwickeltes Waschmittel eingesetzt (keine Trockenwaschmittel!).
2. Die Handschuhe werden bei warmen bis mittleren Temperaturen, die 60 °C/140 °F nicht überschreiten, gewaschen (ca. 40 °C).
3. Die Handschuhe werden für 30 Minuten gewaschen.
4. Die Handschuhe müssen mit kaltem Wasser ausgewaschen werden.
5. Bei starker Verschmutzung wird der Wasch- und Ausspülvorgang wiederholt.

Beim Waschen stark verschmutzter Handschuhe im zweiten Waschgang können einige Stücke grobes Leinen beigelegt werden. Die Reibung zwischen Leinen und Handschuh kann helfen, Schmutz zu lösen und zu entfernen.

Die mechanische Leistung wird nach dem oben beschriebenen Verfahren in 5 Waschzyklen getestet und zertifiziert.

AP 2: CO₂-Fußabdruck des Prüfmateri als

Funktionelle Einheit: Ein Paar Arbeitshandschuhe mit Nitrilschaum (55,5 g Produktgewicht inkl. Verpackung; hergestellt in Shanghai, China)

Datenquelle: Daten über die Produktherstellung, die Transportwege und die Verpackung wurden durch Seiz Industrielhandschuhe GmbH zur Verfügung gestellt (Primärdaten).

Methodik: Der Product Carbon Footprint (PCF) wurde „cradle to grave“ (von der Wiege bis zur Bahre) durchgeführt und beinhaltet somit die Rohstoffgewinnung, deren Transport zum Hersteller, die Produktion inklusive Verpackung, den Transport des fertigen Produkts sowie die Distribution und die Entsorgung am Lebensende. Die Nutzphase kann vernachlässigt werden. Bilanzierung gemäß DIN EN ISO 140671.

Wirkungsabschätzung: Treibhauspotenzial 100 Jahre - IPCC 2021 (GWP100y)

Hintergrunddatenbank: ecoinvent 3.8, Higg MSI 3.3, Industry Data 2.0

Ergebnis: Der CO₂-Fußabdruck von einem Paar Arbeitshandschuhe mit Nitrilschaum beträgt 604 g CO₂e (vgl. Abbildung 10).

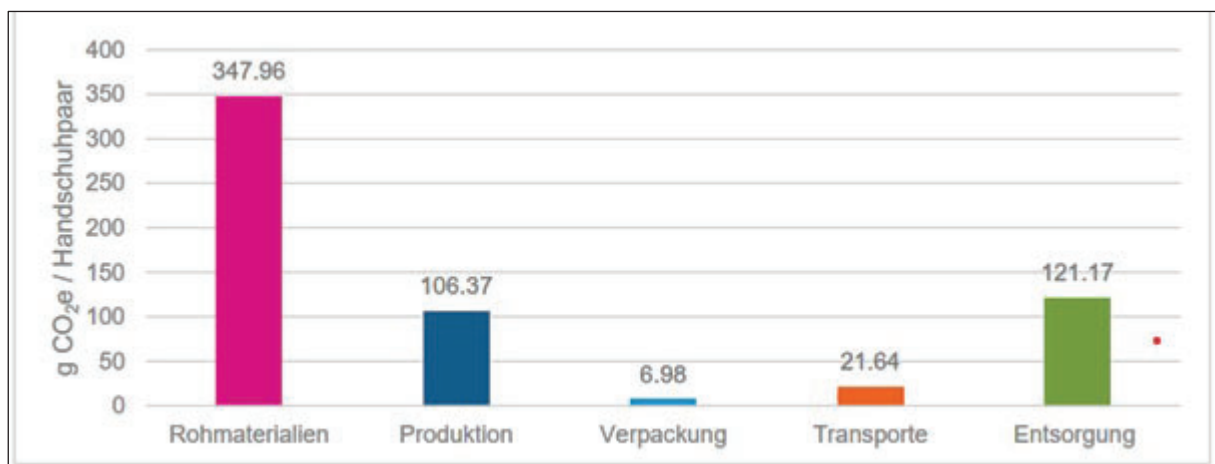


Abbildung 10: CO₂-Fußabdruck von 1 Paar Arbeitshandschuhe mit Nitrilschaum

Dabei entfallen 58 % auf die Rohstoffe inkl. Zulieferung und 20 % auf die Entsorgung. Die drittgrößte Position bildet die Herstellung mit 18 % der Emissionen ab. Zusätzliche Prozesse wie Verpackung und Transport machen jeweils 1 % und 4 % aus. Bei den Rohstoffen stellt vor allem das Spandex mit 66 % der Emissionen, die unter Rohstoffe fallen, den Haupttreiber dar.

AP 2: Prüfplanung zur Charakterisierung der Zwischen- und Endprodukte (Rezyklat)

Materialbestimmung:

- Faserstoffanalyse (qualitative Prüfung, mikroskopische Typreaktion)
- Infrarot-Spektrum (Beschichtung)
- Schmelzpunktermittlung mit Kofler-Heizbank
- Fixiertemperatur/Schmelzpunkt via Differential Scanning Calorimetry (DSC)
- Bestimmung Meltflow-Index (MVR/MFR nach ISO 1133)

Tabelle 1: Prüfplanung zur Produktkategorisierung

Ware/Bestandteil	Prüfmerkmal	Prüfmethode (Norm/Gerät)	Sollwert
Komplettprodukt	Verunreinigungen auf Öl/Tenside	Kombination aus Soxhlet-Verfahren (DIN 54278-1) und Benetzungswinkel-messung	Keine Verunreinigung
obere Wareenseite	Faserstoffanalyse Garn	qualitative Prüfung (mikroskop. Typreaktion), Ausschlussverfahren (Frotteereagenz), Heizbank, DSC-Analyse	PA
Gummizug Bündchen	Faserstoffanalyse Garn	qualitative Prüfung (mikroskop. Typreaktion), chem. Reaktion, Heizbank, DSC-Analyse	EL
Bündchen, farbig	Faserstoffanalyse Garn	qualitative Prüfung (mikroskop. Typreaktion), Ausschlussverfahren (Frotteereagenz), Heizbank, DSC-Analyse	PA
Beschichtung	Materialart	Infrarot-Spektrum	NBR
vorzerkleinerte Reste (Schredder)	Partikelgrößenanalyse	Sichtprüfung (Klassifizierung nach Größe, prozentualer Gewichtsanteil)	Größenverteilung
gemahlene Reste (Mühle)	Partikelgrößenanalyse	nach DIN 66165, Verf. D & F (Maschinsiebung mit bewegtem Sieb und bewegtem Medium), Sichtprüfung (Trennung PA/NBR)	PA/NBR-Partikelgr., Anteil
Rezyklat	Meltflow-Index (MVR/MFR)	nach DIN EN ISO 1133	PA

Dokumentation:

- Fotografische Dokumentation
- Prüfungen je nach Norm/Vorgabe
- Erfassung Versuchsbedingungen (Temperatur, Feuchte)
- Festhalten von Energie- und Stoffeinsatz (Stickstoff, Strom)

Verwertbarkeitsanalyse:

- Plattenherstellung (Heißpresse)
- Granulatherstellung

Arbeitspaket 4: Charakterisierung Ausgangs- und Entstehungsprodukte

Arbeitspaket (AP) 4: Dauer: 11 Monate (Monat 6 – Monat 18)	
Beteiligte Verantwortlichkeit	Verantwortlich für die Durchführung: HSH Unterstützend tätig: Seiz, Daimler, Barthmann
Ziele des Arbeitspakets	Prüfdaten zur Beurteilung der Eignung von einzelnen Prozessstufen und Prozessparametern zu Trennung und Reinigen der Polyesteranteile aus den beschichteten Hand-schuhen
Inhalte und Aufgaben des Arbeitspakets	- Durchführen von Prüfungen gemäß Anforderungsprofil und Prüfpläne - Analyse der Ergebnisse und Prüfung dieser - Identifikation von Ausschlusskriterien

Für die vollständige Charakterisierung der Ausgangsprodukte wurden der Hochschule Hof von jeder Größe ein Paar Handschuhe geliefert. Diese wurden analysiert mit dem Ergebnis, dass der Handschuh zu etwa 44,4 % aus PA besteht (Strickware), zu ca. 49,5 % aus

Tabelle 2: Bestandteile der Handschuhe

Handschuhteil	Bestandteil
Handschuhrücken (Maschenware, grau)	Nylon (Polyamid)
Handschuhrücken (Druck weiß/orange)	Acrylate
Handschuhinnenseite (Beschichtung)	NBR
Handschuhmanschette	Elastan (PUR)
Strickbund (Größenkennz.)	PP, PES, PP/PES

NBR (Beschichtung) und zu 6,1 % aus sonstigen Bestandteilen (Elastan, Druckfarbe, farbige Bündchen). Die am Bündchen angestrickten, größenabhängigen Farbmarkierungen bestehen dabei aus Fremdmaterialgarn, das zuvor nicht spezifiziert war. Es handelt sich um Polypropylen, Polyester oder einer Mischung aus beiden (vgl. Tabelle 2). Diese Stoffe konnten nicht im angedachten Prozess separat abgetrennt werden und störten in der weiteren Verwertung des Faserrohstoffs. Dieser Punkt muss im Rahmen der Warenspezifikation und Deklaration künftig mit den Zulieferern aufgegriffen und abgestellt werden, um die geplante sortenreine Verwendung des Polyamidanteils vornehmen zu können. Die erforderliche Spezifikation des Markierungsgarns kann auch auf weitere Handschuhtypen übertragen werden. Für das Projekt wurde entschieden, dass die gesammelten Handschuhe in jedem Fall für die Trennversuche mit der Kryogenvermahlung genutzt werden sollten. Für die umfangreicheren Technikumsversuche (für Spritzgieß- und Faserspinnversuche) wurde versucht, die Fremdstoffe weitmöglichst zu beseitigen, vornehmlich durch Aussieben (s. auch AP 3: Sieb- und Windsichtversuche).

Zum Projektende konnte der Anteil von NBR und sonstigen Fremdstoffen im Rezyklat auf ca. 33 % reduziert werden (siehe Ausführungen in Arbeitspaket 3: Versuche zur Prozessentwicklung). Als Endprodukt konnte Granulat und ein Kälteschutz-Testhandschuh erzeugt werden.

Arbeitspaket 3: Versuche zur Prozessentwicklung

Arbeitspaket (AP) 3: Dauer: 11 Monate (Monat 6 – Monat 18)	
Beteiligte Verantwortlichkeit	Verantwortlich für die Durchführung: HSH Unterstützend tätig: Seiz, Daimler, Barthmann
Ziele des Arbeitspakets	Zerkleinern der Handschuhe und Trennen der Bestandteile nach verschiedenen Verfahrensabläufen und Bewertung der Verfahren
Inhalte und Aufgaben des Arbeitspakets	• Planung der Versuchsabläufe und Terminierung dieser. • Trennung der anfallenden Handschuhe in verschiedene Klassen und Waschen dieser • Durchführen von Schredderversuchen und kryogenes Vermahlen (Unterauftrag) entsprechend der Versuchsplanung • Durchführung von Siebversuchen und Windsichtversuchen (Unteraufträge) entsprechend der Versuchsplanung • Schmelzsieben und Granulieren der erhaltenen Polyamidfraktionen

AP 3: Beschaffung und Waschen der gebrauchten Handschuhe

Die Beschaffung der gebrauchten Versuchshandschuhe erfolgte über den Kooperationspartner Daimler Truck AG. Nach der Festlegung der Sortiervorgaben sowie der Erstellung einer Waschanleitung wurden die Handschuhe dort gesammelt und anschließend an die Firma Seiz Industriehandschuhe GmbH übergeben.

Nach Erhalt der Testmenge von rund 1.000 kg wurden zunächst 800 kg gemäß den definierten Vorgaben gewaschen. Hierbei kam ein speziell für die Reinigung von Handschuhen entwickeltes Industriewaschmittel zum Einsatz. Eine erste Teilmenge von etwa 400 kg wurde an die Firma Barthmann zur Durchführung initialer Praxistests übermittelt.

Für einen weiteren Versuch wurden im Anschluss nochmals 400 kg an die Firma Barthmann versandt. Die verbleibenden 200 kg wurden besonderen Waschversuchen unterzogen. Ziel dieser Versuche war es, die Beschichtung der Handschuhe gezielt anzugreifen, um die Ablösbarkeit der Beschichtung vom Trägermaterial zu verbessern. In enger Abstimmung zwischen der Firma Seiz und der Hochschule Hof wurden hierzu folgende Waschverfahren definiert:

- Chemische Reinigung mit PER
- CO₂-Reinigung
- Waschen mit Sonderwaschmitteln:
 - *Oseko FAW* (ohne Bleichmittel und optische Aufheller), bei 60 °C in höchster Dosierung (1 kg Waschmittel pro 50 kg Handschuhe)
 - *Blan Compact* (mit Bleichmittel und optischen Aufhellern), bei 60 °C in höchster Dosierung (2 kg Waschmittel pro 50 kg Handschuhe)

Aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit sowie der geringen Erfolgsaussichten der CO₂-Reinigung wurde dieser Ansatz zu einem späteren Zeitpunkt verworfen. (CO₂-Reinigung stellt einer der schonendsten Textilwäsche dar und der Verschmutzungsgrad der Handschuhe war vergleichsweise hoch, daher wird kein hoher Reinigungsgrad erwartet.) Die hierfür vorgesehene Testmenge wurde in die Waschversuche mit den Sonderwaschmitteln integriert.

AP 3: Bewertung des Reinigungserfolges und der NBR-Beständigkeit

Die Handschuhe wiesen nach Wäsche mit einem Standardwaschmittel noch starke Geruchsbildung und Auflagerungen auf, was auf anhaltende Verunreinigungen hindeutete. Daher wurden weitere Wäschen mit Sonderwaschmitteln durchgeführt. Hierzu wurden Waschmittel ausfindig gemacht, welche auf Härtefälle wie Ölverschmutzungen ausgelegt sind, da die untersuchten Handschuhe im Montagebereich genutzt wurden:

Waschmittel	Oseko FAW	Blan Compact
Hersteller/ Vertrieb:	Scheck GmbH & Co. KG, Jungingen	Christeyns GmbH, Offenburg
Anwendung	Öl-, Fett- und Fleckentfernung, z. B. für Feuerwehrschatz- und Ar- beitskleidung	Reinigung kontaminierter Flamm- schutzkleidung, z. B. in der Öl- und Gasindustrie
Bleichmittel	nicht enthalten	enthalten (Sauerstoff)
optischer Aufheller	nicht enthalten	enthalten
Umwelthinweise	• schädlich für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung • Freisetzung in die Umwelt vermeiden • Hautreizungen, Augenschäden	• Tenside sehr gut biologisch abbaubar • enthält keine APEO-Tenside, EDTA, NTA • phosphatfrei • COD- Wert: 325.574 mg/kg

Ziel war die Entfernung von Auflagerungen wie Fette, Öle und sonstigen Verschmutzungen. Vergleichend zu diesen Wäschen wurde noch eine chemische Reinigung durchgeführt. Letztere hatte zum Ziel, die NBR-Beschichtung auf den Handschuhen anzugreifen, um die Separation vom Textilgrund zu begünstigen.

Zur Bewertung des Wascherfolgs wurden die gewaschenen Handschuhe optisch, haptisch und chemisch untersucht. Vereinzelt wiesen die Handschuhe zwar eine bretharte Optik und Tendenz zur Versprödung auf, dies betraf jedoch eine statistisch nicht relevante Menge, weshalb die Ursache für das Versprödungsverhalten nicht klar zuzuordnen waren. Generell konnte nicht festgestellt werden, dass sich die NBR-Beschichtung vom Textilgrund löst, auch wenn

ein Spezialwaschmittel verwendet wurde. Der Reinigungserfolg wird als vergleichbar mit dem Standardwaschmittel eingeschätzt.

Bei Untersuchungen auf Abrieb der Beschichtung konnten ebenfalls keine Ablösung festgestellt werden (kein Abbröckeln oder Abschmieren auf Oberflächen).

Aufgrund der starken Geruchsentwicklung der gewaschenen Handschuhe wurden diese auf das Vorhandensein von Auflagerungen untersucht. Hierzu wurden Testwaschung mit destilliertem Wasser bei 60 °C durchgeführt, um eine Testflotte zu erhalten. Diese Testflotte enthielt nach dem Waschen Begleitstoffe, die die Flüssigkeit eingetrübt haben. Eine Messung des Kontaktwinkels der Waschflotten ergab eine signifikant geringere Oberflächenspannungswerte als Wasser, daher waren mit hoher Wahrscheinlichkeit spannungsherabsetzende Stoffe enthalten (PE). Vergleichswäschen neuer Handschuhe ergaben klare Flotten (vgl. Abbildung 11).



Abbildung 11: li.: Testflotte zur Kontaktwinkelmessung, re.: Flotte für Dünnschicht-Chromatographie

Zur Untersuchung, ob sich die Beschichtung durch Heißwäsche verändert, wurden mehrere Testwäschen gem. DIN EN 6330 bei $(92 \pm 2)^\circ\text{C}$ mit Tumbler-Trocknung bei 80°C durchgeführt. Es konnte keine optische Veränderung der Handschuhbeschichtung festgestellt werden. Es gab auch keine haptisch feststellbaren Veränderungen der Beschichtung (nicht klebrig/gelig, nicht verhärtet oder bröckelig). Die Maschenware zeigte eine sehr leichte Zunahme an Haarigkeit und die Haptik des Handschuhs war insgesamt etwas weicher.

Da NBR eine geringe bis schlechte UV-Beständigkeit aufweist, wurde untersucht, wie sich die Beschichtung der Handschuhe unter UV-Bestrahlung verhält. Es wurde nach 24, 48, 72 und 163 Stunden Bestrahlung jeweils eine optische und haptische Einschätzung vorgenommen. Die Handschuhe haben sich innerhalb dieser Zeitspanne jedoch nicht signifikant verändert.

AP 3: Schredderversuche und kryogenes Vermahlen

Die gewaschenen Handschuhe wurden bei Fa. Barthmann angeliefert, geschreddert und anschließend schneidgemahlen (Siebgrößen: 8 und 10 mm), s. Abbildung 12. Hierbei wurde



Abbildung 12: li. Handschuhe im Ganzen und schneidgemahlen, re.: Schneidsieb

festgestellt, dass das Sortierverfahren bei Daimler noch optimiert werden muss, da es zu etlichen Fehlwürfen mit Handschuhen anderer Zusammensetzungen, sowie Einwurf diversen Abfalls gekommen ist. Es war ersichtlich, dass die Handschuhe nicht vollständig gereinigt werden konnten. Eine Optimierung des Waschprozesses erscheint daher sinnvoll (vgl. Abbildung 13).



Abbildung 13: Lieferung gewaschener Handschuhe bei Fa. Barthmann.
li.: Fremdhandschuhe, mi.: stark verschmutzte Test-Handschuhe, re.: Fremdstoffe (Plastik, Cellose, Schaum)

Zur Vermeidung der Verunreinigung des Versuchsgutes wurde dieses vor dem Schreddern und Schneidmahlen nachsortiert. Da eine Trennung der Beschichtung vom Strickgrund in der Größenordnung des Mahlgutes von 8 bis 10 mm noch nicht möglich war (vgl. Abbildung 18) wurde die schneidgemahlene Ware noch einmal kryogen vermahlen.

Hierzu wurde auf eine Prallstrommühle (DemiNo 2250) der Aufbereitungstechnologie Noll GmbH in Bobingen zurückgegriffen. Die Firma bietet Prallstrommühlen an, die im Niedrigtemperaturbereich betrieben werden können und sich für die Trennung von NBR-Beschichtung vom PA-Untergrund eignen. Grund ist, dass Materialien unter Kälteeinwirkung verspröden und sich so leichter zerkleinern und in kleine Partikel zerlegen lassen. In der Prallstrommühle wirken zudem Scher-, Reib- und Prallkräfte auf das vorzerkleinerte Material ein (s. Funktionsprinzip in Abbildung 14). Zur Reduzierung der Korngrößen des Aufgabegutes, und damit zur Deagglomeration der

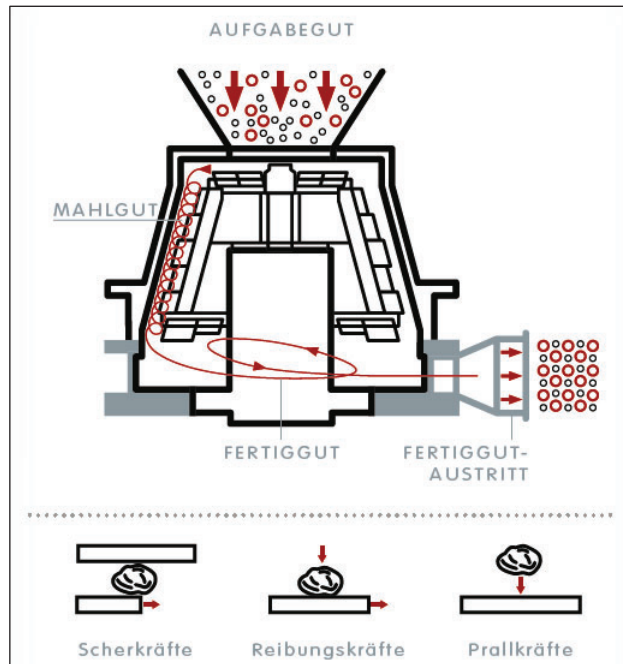


Abbildung 14: Funktionsprinzip einer Prallstrommühle (Typ DemiNo®) der Aufbereitungstechnologie NOLL GmbH

Partikel, wird außerdem ein turbulenter Luftstrom erzeugt. (Aufbereitungstechnologie NOLL GmbH 01.03.2018) Die kryogenen Mahlversuche fanden mit unterschiedlichen Maschinenkonfigurationen statt, um Durchsatz und Qualität des Mahlgutes beurteilen zu können. So hat bspw. der Einsatz verschiedener Rotortypen dazu geführt, dass der Durchsatz mit einer Type zwar erhöht werden konnte, gleichzeitig jedoch die Länge der Strickgarne nicht kurz genug war, um die Beschichtung gut genug ablösen zu können.



Abbildung 15: Kryogenschnecke mit Prallstrommühle



Abbildung 16: Materialzuführung mit Schnecke

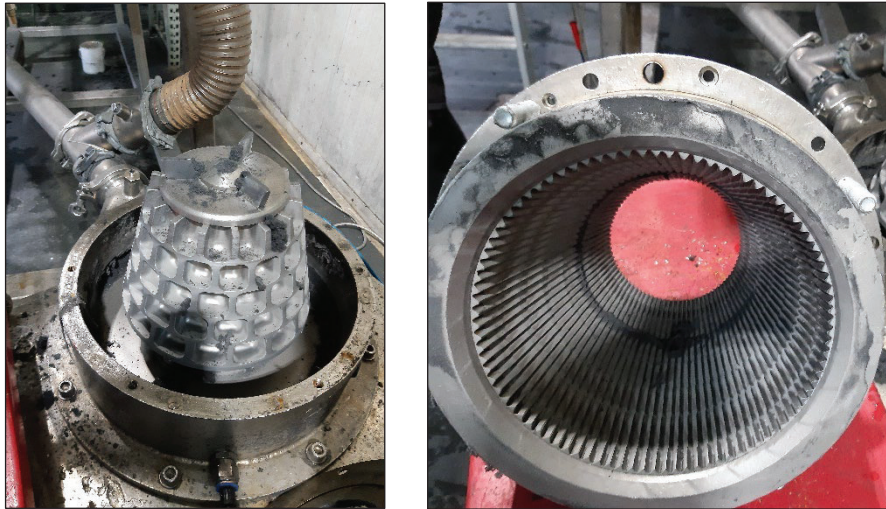


Abbildung 17: Inneres der Prallstrommühle (links) mit oberer Abdeckung (rechts)

Der Ein- oder Ausbau der Zellradschleuse (nach dem Zuführtrichter, vor der Kryoschnecke) kann die Materiallieferung und damit dessen Verweilzeit in der Kühlzone beeinflussen. Gleiches gilt für die stickstoffgespülte Schnecke zur Prallstrommühle (s. auch Abbildung 15 bis Abbildung 17). Nach der Prallstromvermahlung unter Stickstoffzugabe (Mahlspace von 0,8 mm) war der textile Bestandteil des Handschuhs extrem kurzfasrig und der NBR-Anteil pulverig (vgl. Abbildung 19).



Abbildung 18: Material, schneidgemahlen



Abbildung 19: Material, kryogen gemahlen

Siebversuche im Labormaßstab ergaben sehr unterschiedliche Partikelgrößen, von sehr großen bis sehr kleinen Partikeln (vgl. Abbildung 20), wobei die kleinsten im Bereich von 150 bis 250 μm lagen. Näheres siehe AP 3: Sieb- und Windsichtversuche.

Die Fa. Noll Aufbereitungstechnik entwickelt gerade einen anderen Mühlentypen, der auf die Zerkleinerung textiler Materialien ausgelegt ist und nicht kryogen sondern mit Wasser gekühlt ist, um hier die Prozesskosten und den Energieaufwand zu reduzieren. Tests mit einem Prototyp im Technikumsmaßstab führten bisher noch zu nicht zufriedenstellenden Ergebnissen. Besonders die Größe der Partikel, sowie ihre Verschmelzung durch Hitzeeinwirkung, ist ein Problem. Die Maschine befindet sich noch in der Entwicklung und könnte in einem überarbeiteten Stadium für textile Anwendungen von Interesse sein.

AP 3: Sieb- und Windsichtversuche

Zur Beurteilung der Trennfähigkeit des entstandenen Mahlgutes wurden diverse Siebversuche mit mikroskopischer und chemischer Analyse des Siebgutes durchgeführt.

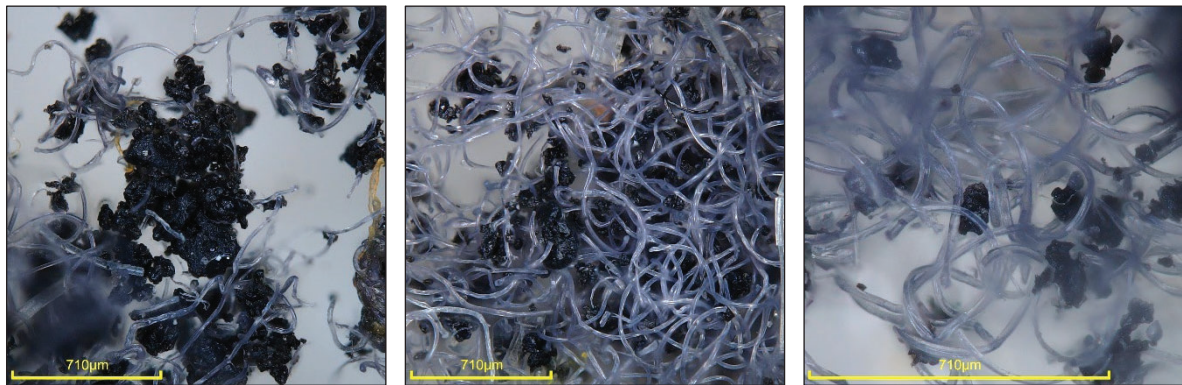


Abbildung 20: Mikroskopie der kryogen vermahlenden Proben nach einem Siebversuch im Labormaßstab

Die Hochschule Hof verfügt über eine Vibrationssiebmaschine mit welcher es möglich war, Mahlgut zu fraktionieren (s. Abbildung 21), jedoch nur im schneidgemahlenen Zustand, nicht aber in der kryogen vermahlenden Variante. Grund dafür ist die hohe Wolligkeit des zu trennenden Materials durch den Faseranteil.



Abbildung 21: Fraktionen schneidgemahlenes Siebgut

Im Januar 2024 fand ein Versuch bei Fa. Noll zur kryogenen Vermahlung mit direkt anschließender Siebung mit Vibrationsiebverfahren im Industriemaßstab statt. Die Vibrationssiebmaschine besteht aus einem runden Maschensieb, welches zur besseren Reinigung der Sieböffnungen mit einem Ultraschallgeber und einem Ball-Abklopf-System unterhalb der Siebfläche versehen ist (s. Abbildung 23). Die ultraschallgestützte, sofortige Siebung sollte der Kompaktierung des Materials entgegenwirken, welche sich durch Abfüllen und anschließendes Trocknen des kryogenen Mahlgutes einstellt. Ziel war es, die Trenneigenschaften des gemahlten Faser-Beschichtungsgemisches zu verbessern. Der Materiallauf gestaltete sich allerdings schwierig und wies einen sehr geringen Materialdurchsatz (2 kg/h) auf. Es kam zum Aufbau von Schichten auf dem Vibrationssieb, dadurch wurde der Durchgang von Störstoffen bzw. Kurzfasern (Beschichtungspartikel aus NBR, Elastan- und PP/PES-Teilchen aus dem Bündchen) behindert. Die Methode wurde daher als nicht zielführend zur Separation der zerkleinerten Handschuhbestandteile eingestuft. Es wurde daher an der Hochschule Hof in eine Labor-Luftstrahlsiebmaschine investiert, welche das Siebgut durch Lufteinblasung auflockert und Agglomerate löst, indem es das Siebgut gegen den Deckel der Siebmaschine schlägt (s. Abbildung 26). Dieses Verfahren eignet sich besonders für



Abbildung 23: Vibrationssiebmaschine mit Ultraschallaufsatz

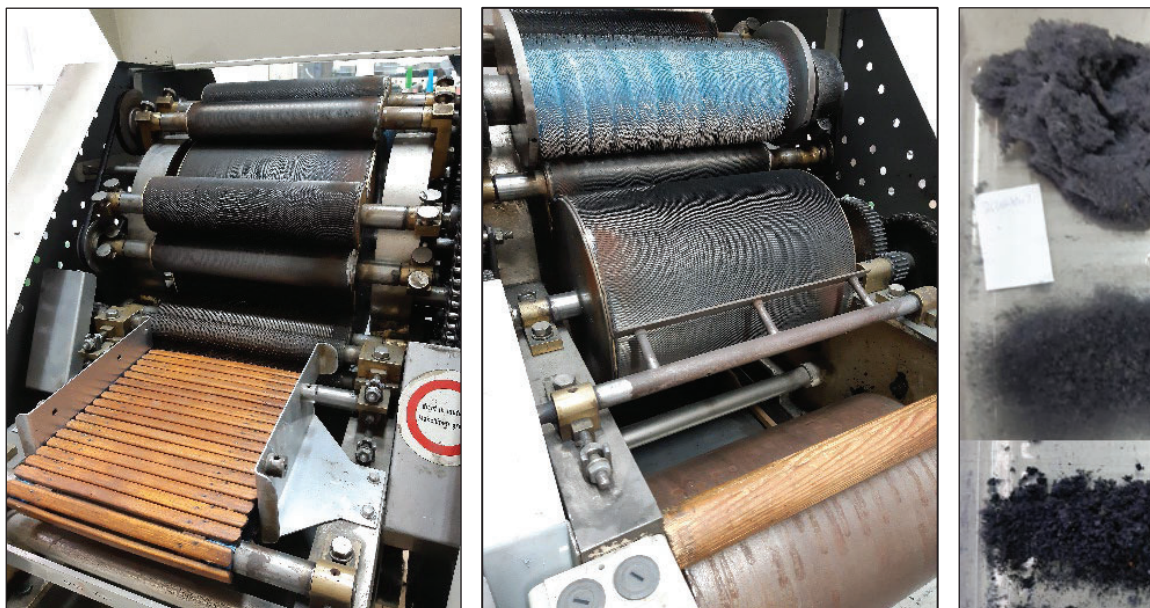


Abbildung 22: Laborkrempel bei Spinnerei Neuhof, li.: Vorderseite, mi.: Rückseite, re.: gekämmtes Material

pulverförmige Substanzen und hat daher seine Schwächen in der Verwendung mit zerkleinertem Fasermaterial, welches Kleinpartikel einschließt (vgl. Abbildung 20). Zur zusätzlichen Auflockerung des Materials, mit Absicht der Auflösung von Faserbündeln und Freigabe der Störstoffpartikel, wurde auf Kämmen zurückgegriffen. Zum Auskämmen von Fein- und Störbestandteilen wurde eine Laborkrempel aus der Vliesstoffvorbereitung herangezogen (s. Abbildung 22).

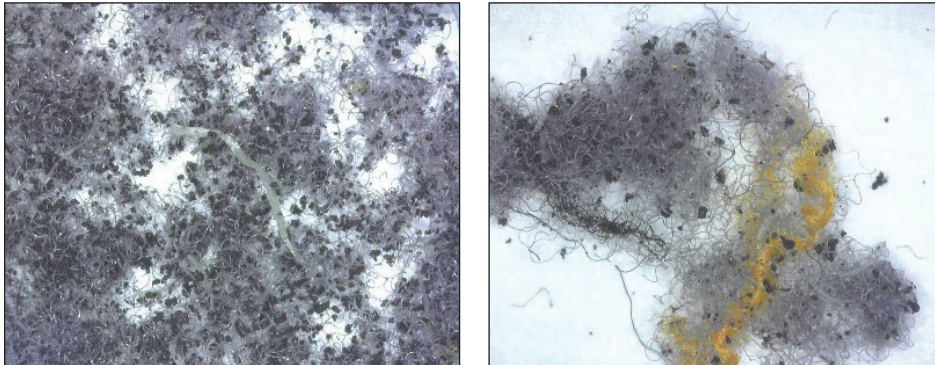


Abbildung 24: Gekämmtes Material (schwarz: NBR, gelb: PP/PES, weiß: EL)



Abbildung 26: Luftstrahlsiebmaschine mit Kammstabdeckel, Maschensieb und Zyktronbehälter

Die Versuchskrempel der Spinnerei Neuhoof verfügt über Walzen mit unterschiedliche Garnituren – Walzenbeläge mit Zähnen oder Haken – zum Vergleichmäßigen der Fasern. Es wurden Feinfasern und Grobbestandteile des kryogen gemahlene Guts voneinander abgetrennt (s. Abbildung 22). Mikroskopaufnahmen der ausgekämmten Partikel ergaben, dass das Material zwar aufgelockert war, sich die Beschichtungspartikel jedoch eher gleichmäßig zwischen den Faserbündeln



Abbildung 25: Kammstabdeckel Laborsieb

verteilt und einen Partikel-Faser-Flor gebildet hatten, anstatt ausgekämmt zu werden (vgl. Abbildung 24). Die Fraktionierung konnte entsprechend nur nach sehr groben Partikeln, Feinstfasern und Restbestandteile mit Beschichtungskleinpartikeln vorgenommen

werden. Zur Kombination eines Kämmverfahrens mit Luftstrahlsiebung im Labormaßstab wurde ein Deckelaufbau mit Kämmstäben entwickelt, welcher an die Luftstrahlsiebmaschine der Hochschule Hof angebaut wurde (s. Abbildung 26). Die Kämmstäbe im unteren Teil des Aufbaus rotieren separat von der Blasdüse parallel zum Siebboden und streifen das Kammgut gegen die Kämmstäbe im Deckel (s. Abbildung 25). Ziel ist es, die Faserknäule durch Kämmen zu öffnen und die gefangenen Störstoffe freizulegen, um sie abzuführen. Zu Untersuchungszwecken wurde die Feinfraktion mittels Zyklonaufbau aufgefangen.

Es wurde festgestellt, dass die Beschichtung in Spuren auch nach dem kryogenen Vermahlen an den Fasern klebt (vgl. Abbildung 27). Zusätzlich verklumpt das Material durch den Mahlprozess, und ist dadurch nicht siebbar trotz Zusatzauflösung mit Kämmstäben. Knöllchen (ca. 3 mm) halten Teilchen noch fest oder sind mit diesen verbunden. Das Trennergebnis ist auch von der Kämmdauer und dem Einsatz der Siebe abhängig, wobei längeres Kämmen und mehrere nacheinander geschaltete Siebdurchläufe das Ergebnis verbessern (vgl. Abbildung 28 und Abbildung 29).

Es zeigte sich eine Abscheidewirkung von Feinfraktion mit Störstoffen (NBR, EL, PP/PES) bei hohem PA-Gehalt des ausgekämten Rückstandes. Es geht jedoch noch zu viel PA-Material verloren.

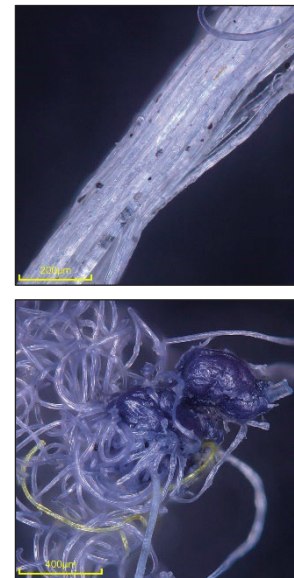


Abbildung 27: Fasern mit NBR-Resten

Im Gegensatz zu Vibrationssiebmaschinen gibt es keine Luftstrahlsiebmaschinen im industriellen Maßstab. Es wurde daher auf Wirbelstromsieben als annähernd ähnliches Verfahren ausgewichen, um über den Labormaßstab bei der Partikeltrennung hinauszukommen.

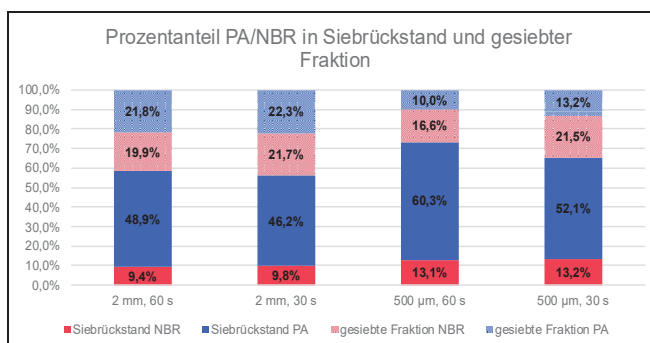


Abbildung 28: Sieb-Kardier-Versuch, einstufig, unterschiedliche Siebzeiten

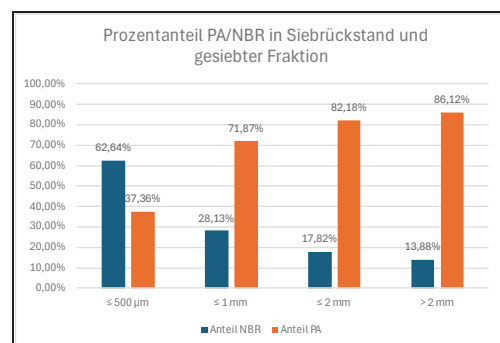


Abbildung 29: Sieb-Kardier-Versuch, mehrstufig, unterschiedliche Siebe



Abbildung 30: re.: JEL Palafix, mi.: leerer Siebkorb, re.: Lamellenrotor ohne Stauscheibendeckel

Hierfür wurde eine Zentrifugalsiebmaschine (JEL Palafix 200/300) der J. Engelsmann AG getestet. Die Maschine dient der Agglomeratauflösung sowie dem Entstauben und wird vornehmlich für Pulver und Granulate eingesetzt. Die Maschine besteht aus einer Förderschnecke, welches das Siebgut auf einen Siebzylinder transportiert, auf dem es durch Lamellenleisten gleichmäßig verteilt wird, wodurch eine Zentrifugalwirkung entsteht (s. Abbildung 30). Das Siebgut wird dabei in Feingut (passiert das Sieb) und Grobgut (Sieb nicht passiert) eingeteilt.

Es kamen unterschiedliche Siebeinsätze zum Einsatz (3 mm, 2,5 mm, 1,5 mm und 1 mm), um mehrere Trennschärfen zu testen. Als gute Siebgröße hat sich eine Maschenweite von 2,5 mm erwiesen, welche die höchste Ausbeute an Polyamid (49,5 %) mit einer Verlustrate von 13 % von PA-Kleinfasern aufwies (vgl. Abbildung 31). Es ist zu erwarten, dass durch mehrere Siebdurchgänge die Reinheit des Polyamids erhöht werden kann, was allerdings die Polyamid-Ausbeute verringern würde. Das Verfahren

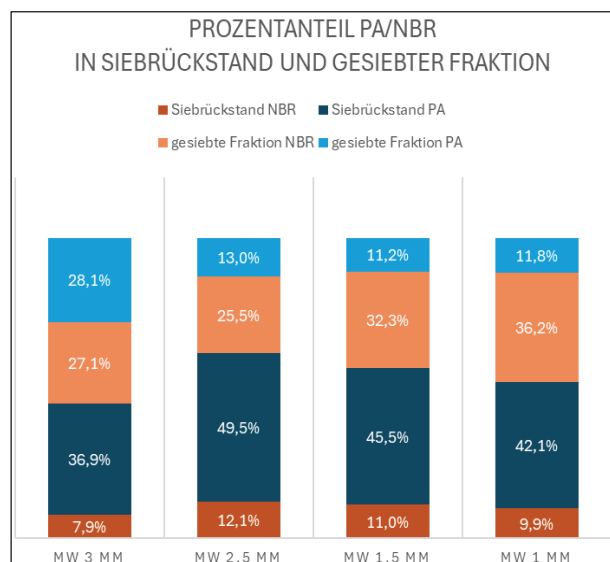


Abbildung 31: Siebfraktionen Wirbelstrom

wird als vielversprechend für die Textilseparation eingestuft, muss allerdings optimiert werden, besonders was die Lamellenform angeht. Auch eine Zulieferung direkt von der

Prallstrommühle ist vorzuziehen, um eine Kompaktierung des Materials durch Abfüllen und Transport zu vermeiden.

Als Separationsprozess war ursprünglich Windsichten angesetzt, diese Methode wurde nach Rücksprache mit Maschinenherstellern jedoch als nicht zielführend eingeschätzt. Zwar ist die Trenngrenze von Windsichtern, je nach Maschinenmodell, bei 0,003 bis 0,6 mm (Hiersig 1995), jedoch sind die Eigenschaften des Sichtgutes unpassend für die Methode.

Für Windsichten sind Form, Korngröße und Dichte der Materialien entscheidend. Zwar handelt es sich bei den Fasern des PA-Gestricks um linienförmige Gebilde, und die Beschichtungspartikel können als näherungsweise kreisförmig kategorisiert werden. Aber die Dichte der Materialien ist zu ähnlich, um sie mit einem luftbasierten Sichtverfahren zu trennen (Dichte NBR: 1,35 bis 1,50 g/cm³; Dichte PA 6.6: 1,14 g/cm³). Hinzu kommt die Kräuselung der zerkleinerten Fasern, was zu Haufenbildung führt, welche Beschichtungspartikel einschließen (vgl. Abbildung 20). Eine Trennung mit Windsichten ist daher nicht möglich.

Nach Abschluss des Projektes konnten noch Laborversuche zur Trennung der NBR-Partikel von den Polyamidkurzfasern über ein Flotationsverfahren durchgeführt werden, was sich als sehr zielführend herausgestellt hat. Bei den Versuchen wurde das kryogen vermahlene Material in Wasser aufgerührt. Im Anschluss hat sich der NBR-Anteil im Rührbehälter abgesetzt und die PA-Fasern haben sich an der Wasseroberfläche gesammelt. Der Rest-NBR-Gehalt der Fasern konnte bis zum Zeitpunkt der Berichtstellung leider noch nicht geprüft werden scheint allerdings wesentlich geringer als bei den trockenen Separationsverfahren zu sein.

Nachteilig wäre bei einem Flotationsverfahren der erforderliche Energieeinsatz für die Trocknung, was sich jedoch über einen höheren Reinigungsgrad und eine bessere Ausbeute relativieren kann.

AP 3: Schmelzsieben und Granulieren der Polyamidfraktion

Polyamidfasern werden über das Schmelzspinnverfahren gewonnen, wobei geschmolzene Spinnmasse durch feine Düsen gepresst und das erhaltene Gespinst aufgewickelt wird. Anschließend erfolgt eine Weiterverarbeitung als Stapel- oder Endlosfaser zum Garn.

Aufgrund des hohen Störstoffanteils von ca. 20 % in der ausgesiebten Grobfraction (Fraktion mit hohem PA-Anteil) konnte kein industrielles Schmelzspinnverfahren durchgeführt werden – für diese Art von Verfahren liegt der maximale Störstoffanteil bei ca. 1 %. Es ist davon auszugehen, dass die Störstoffe die Garneigenschaften in einem solchen Ausmaß negativ beeinflussen, dass kein Polyamid-Recyclinggarn mit vergleichbar guten Eigenschaften zum Ausgangsgarn herstellbar ist. Zudem stand für Versuche nur eine Kleinmenge an Versuchs-Rezyklat im gesiebten Zustand zur Verfügung. Entsprechend wurde auf einen Doppelschneckenextruder im Labormaßstab ausgewichen, um zumindest Granulat zu gewinnen. Hierzu wurde auf eine Technikumsmaschine des Instituts für Kunststoff- und Kreislauftechnik der Leibniz Universität Hannover genutzt (Typ: „Process 16“ von thermo scientific, s. Abbildung 32).

Der Doppelschneckenextruder ist modular aufgebaut und ermöglicht das Aufschmelzen und Entgasen von Thermoplasten. Die entstehende Schmelze wird in einem Wasserbad zum Strang gezogen und anschließend einem Häcksler zugeführt.



Abbildung 32: Doppelschneckenextruder „Process 16“ beim IKK, Hannover

Da sich der Zuführtrichter mit Schnecke nicht ohne Weiteres mit dem kryogen vermahlenden und gesiebten Rezyklat befüllen lässt, wurde dieses beim IKK Hannover pelletiert und anschließend getrocknet. Das Rührwerk des Zuführtrichters hat diese Pellets teilweise zerstört, was die Rieselfähigkeit und damit die Lieferung an den Extruder herabgesetzt und die Strangbildung im Wasserbad erschwert hat. Insgesamt war die Materialzufuhr auf diese Weise jedoch

möglich. Nach Befüllen der Maschine wurden die Pellets bei ca. 250 °C aufgeschmolzen und durch eine Düse ($d = 2,5 \text{ mm}$) gepresst, das geschmolzene Material zum Strang gezogen und zerkleinert. Es konnte ein konstanter Materialstrom erreicht werden, auch wenn es gelegentlich zum Abriss des Granulatstrangs im Wasserbad kam. Im Resultat konnte eine kleine Menge an Granulat gewonnen werden (s. Abbildung 33). Beim Aufschmelzen des Materials kam es zu einer unangenehmen Geruchsentwicklung am Extruder, was auf die enthaltenen Störstoffe im Rezyklat zurückzuführen ist.



Abbildung 33: li.: PA/NBR-Pellets, mi.: PA/NBR-Granulat, re.: PA/NBR-Spritzgussteil

Ein Teil des PA/NBR-Gemisch-Granulats wurde für die Herstellung von Spritzguss-Prüfkörpern verwendet, um dessen Eigenschaften zu prüfen:

Tabelle 3: Vergleich der Eigenschaften von rPA mit PA6 für Extrusionsanwendungen

	PA mit 20%iger Störstoffbelastung (NBR, EL, PP/PES, etc.)	Literaturquellen (BASF SE 2022; Schröder 2014; PLASTTRADE Plastic Solutions; noltewerk GmbH & Co. KG; Amsler & Frey AG 01.08.2016)
Biegefestigkeit [N/mm ²]	32,19	30 – 105
Dehnung [%]	>15,5	200
Zugfestigkeit [N/mm ²]	35,84	40 – 50
Streckgrenze [N/mm ²]	32	32 – 80
E-Modul [N/mm ²]	1200	1400 – 3330

Wie in Tabelle 3 ersichtlich, liegen die Eigenschaften des rPA's im unteren Bereich, was einen Vergleich mit der Biegesteifigkeit und die Streckgrenze von PA6 angeht. Die Dehnungseigenschaften sind vergleichsweise gering, aber die Zugfestigkeit des rPA's kommt an die Untergrenze von Vergleichsmaterialien für Extrusionsanwendungen heran. Das E-Modul des rPA's liegt erheblich unterhalb der aus der Literatur bekannten Quellen.

Mögliche Anwendungen für ein so hergestelltes Granulat könnte in der Herstellung von Spritzgussteilen liegen, welche die in Tabelle 3 aufgeführten Zug-/Biegeeigenschaften tolerieren. Die Fa. Seiz kann sich bspw. die Herstellung von Handschuhhaltern aus dem eigenen Produktportfolio vorstellen. Diese dienen der Befestigung der Handschuhe an der getragenen Schutzkleidung mittels Karabinerhaken (s. Abbildung 34). Andere Anwendungsmöglichkeiten dieser Art wären Clips für Verschlüsse oder Klammern für Weinreben.



Abbildung 34: Handschuhhalter der Fa. Seiz

Arbeitspaket 5: Demonstratorversuche

Arbeitspaket (AP) 5: Dauer: 6 Monate (Monat 19 – Monat 24)	
Beteiligte Verantwortlichkeit	Verantwortlich für die Durchführung: Barthmann Unterstützend tätig: Seiz, HSH, Daimler
Ziele des Arbeitspakets	Prozessdefinition auf Basis der in AP 3 und 4 gewonnenen Ergebnisse und Erzeugung einer größeren Menge Versuchsgranulat (Größenordnung 1 Tonne) zur Bewertung der Prozesseignung und Prüfung der Materialeigenschaften
Inhalte und Aufgaben des Arbeitspakets	• Definition der optimalen Prozesskette, Versuchsplanung und -durchführung • Charakterisierung der Materialeigenschaften und Untersuchung der Reproduzierbarkeit • Test der Verarbeitbarkeit des entstehenden Granulates im Spritzgussverfahren und Schmelzspinnverfahren • Analyse der Ergebnisse in Bezug auf die Verarbeitung und den Aufwand • Überprüfung und ggf. Überarbeitung der Konstruktions- und der Prozessvorgaben • Ableiten von Beschaffungsvorgaben und Konstruktionsvorgaben für Handschuhneuentwicklung • Überarbeitung der Sortier-, Beschaffungs- und Reinigungsvorgaben • Kosten-Nutzen-Analyse und CO₂-Abdruck-Bewertung

Entgegen der Zielsetzung des Arbeitspakets konnte keine Granulatmenge in der Größenordnung von 1 Tonne erzeugt werden. Gründe hierfür waren der Gehalt an PP/PES im Strickgrund und ein zu geringer Durchsatz des Materials, sowohl bei der Kryogenvermahlung als auch bei der Wirbelstromsiebung (vgl. Ausführungen zu Arbeitspaket 3: Versuche zur Prozessentwicklung). Dies hat sich durch die Beschaffenheit des Materials, besonders durch die Bildung von Faserknäulen und -haufen nach der Zerkleinerung, und durch Kompaktierung des Materials bei der Materiallagerung und -lieferung ergeben.

Von der äußeren Materialbeschaffenheit des Rezyklats abgesehen, war es nicht möglich, den Handschuh-Strickgrund aus Polyamid zu einem für Extrusion bzw. Schmelzfilterung sicheren Prozentsatz (< 1 %) von der NBR-Beschichtung zu trennen. Die Anhaftung der Beschichtung auf dem Strickgrund ist speziell in den Fingerkuppen und Zwickeln besonders hoch (vgl. Abbildung 35). Dies ist begründet in der offenen Maschenstruktur sowie Fadenverkreuzungen, wodurch die NBR-Dip-



Abbildung 35: durchgedrückte Beschichtung Innenseite

Beschichtung tief in das Garn eindringt, sodass sich die Beschichtung bei der kryogenen Vermahlung oft nicht rückstandsfrei vom PA-Garn ablöst. Bei der Herstellung des Handschuhs sollte das Recycling mit bedacht werden, und Maßnahmen getroffen werden, damit die Beschichtung nicht durch den Strickgrund dringt.

Hinzu kam der Einfluss weiterer Störstoffe im Handschuh – PP/PES, EL, Akrylate, Reste von Verunreinigungen durch Nutzung, welche nicht durch Wäschen entfernt werden konnten – die eine Extrusion negativ beeinflussen. Granulaterzeugung im Kleinmaßstab war jedoch möglich. Es kann keine Aussage zur Ausbeute mit diesem Prozess getroffen werden. Bei der Extrusion an der Labormaschine gingen von der eingefüllten Menge ca. ein Drittel verloren. (Dies kann allerdings nicht auf eine Maschine im Industriemaßstab übertragen werden.)

Die Verarbeitbarkeit des Granulats im Spritzgussverfahren konnte im Labormaßstab nachgewiesen werden und wird als gut bewertet. Jedoch sind die Eigenschaften des Granulats hinsichtlich der Materialzusammensetzung zu optimieren. Aufgrund der geringen Menge an Granulat und der darin enthaltenen NBR-Verunreinigungen konnte kein Garn zur Herstellung eines neuen Handschuhs erzeugt werden.

Im Zuge von Untersuchungen alternativer Verwendungsmöglichkeiten für das ungesiebte Handschuh-Rezyklat wurden Platten aus den zerkleinerten Materialien gepresst (s. Abbildung 36) und deren Kennwerte ermittelt (Dicke, Zugfestigkeit).



Erreichte Dicken: 1,1 bis 1,4 mm

Höchstzugkraft: 7,15 N

Biegefestigkeit: 3,15 N

Abbildung 36: Gepresste Testplatten (ausgesiebte Fasern)

Die dünn-schichtigen Platten wiesen geringe Stabilität und Dehnung auf. Dies war bedingt durch die genutzte Form, welche aufgrund der Bauschigkeit des Materials nur eine begrenzte Füllmenge erlaubte. Optimierungen in Druck, Verweilzeit und Temperatur (215 °C) könnten die Platten verbessern. Bei Temperaturanstieg (z. B. um 20 °C) tritt jedoch Materialschwind und damit Rissbildung auf.

Am Sächsischen Textilforschungsinstitut e.V. (STFI) wurde zudem auf einer Airlaid-Vliesanlage – bestehend aus Faserdosierung, Formierkopf, Ablageband und Thermofusionsofen – ein Vliesstoff hergestellt. Der Wirrvliesstoff aus Rezyklat-Kurzfasern wurde mit Bikomponenten-Fasern aus Polyester vermischt und das Airlaid-Vlies thermisch verfestigt (s. Abbildung 37). Die Methode ergab einen guten Zusammenhalt der Fasern im Vlies (unterstützt durch separaten Vliesrücken).



Abbildung 37: li.: Förderband mit grauer Handschuh-Rezyklat und weißen Biko-Fasern, re.: Faserflor

Das Produktmanagement-Team der Firma Seiz hat im Rahmen der Auswertung der Airlaid-Testreihe untersucht, welche potenziellen Einsatz- und Anwendungsgebiete die gewonnenen Materialien im Hinblick auf ihre Verwendung im Handschutzbereich aufweisen.

Die Analyse ergab, dass das gewonnene Material sehr gute Isoliereigenschaften besitzt. Besonders im Bereich des Kälteschutzes zeigen sich die Eigenschaften in Kälteschutzhandschuhen als ausgesprochen vorteilhaft.

In der unternehmenseigenen Musterproduktion von Seiz wurde in enger Zusammenarbeit zwischen der Entwicklungsabteilung und dem Produktmanagement-Team ein Handschuh

konzipiert, der optimal für den Einsatz im Kälteschutz geeignet ist. Erste Praxistests bestätigten, dass die Schutzeigenschaften des Handschuhs in realistischen Anwendungsszenarien sehr überzeugend ausfallen (konvektive Kälte und Kontaktkälte; -50 °C; Prüfung auf Abfall der Temperatur im Handschuh; bspw. auf -7/bis -15 °C für Anwendungen in Kühllhäusern). Die nachfolgenden Abbildungen dokumentieren die Verarbeitung des Flächenmaterials als Dämmschicht im Handschuh.



Abbildung 38: Kälteschutzhandschuh mit Rezyklat-Vlieseinlage

Als einziger Nachteil im derzeitigen Entwicklungsstadium wurde die eingeschränkte Flexibilität des Handschuhs identifiziert. Die Fingerfertigkeit ist im Vergleich zu bestehenden marktverfügbaren Modellen nicht optimal. Derzeit werden verschiedene Trägermaterialien des Ausgangsstoffs geprüft, um die Flexibilität zu verbessern. Nach erfolgreicher Optimierung ist in einem weiteren Schritt die Durchführung einer Normprüfung gemäß EN 511 durch ein unabhängiges Prüfinstitut erforderlich, um die Markteinführungsfähigkeit zu bestätigen.

Arbeitspaket 6: Berichtswesen und Projektleitung

Arbeitspaket (AP) 6: Dauer: 24 Monate (Monat 1 – Monat 24)	
Beteiligte Verantwortlichkeit	Verantwortlich für die Durchführung: HSH Unterstützend tätig: Seiz, Barthmann
Ziele des Arbeitspakets	Sicherstellung des Informationsflusses und der Termineinhaltung/-Koordination, Zusammenfassung der Daten sowie Erstellung der Dokumentationen
Inhalte und Aufgaben des Arbeitspakets	• Projektkoordination • Terminplanung der Versuche und des Informationsaustausches • Planung der Materialflüsse und Probenentnahmen • Dokumentation und Archivierung • Berichterstellung und Veröffentlichung

Über die Dauer des Projektes wurden frequent Projekttreffen mit den Projektpartnern durchgeführt, Versuche koordiniert und Informationen zum Projektfortschritt ausgetauscht.

Die Termin- und Versuchsplanung, sowie Probennahme, Versuchsdokumentation und -auswertung, erfolgte dabei über die Hochschule Hof.

Während des Projektverlaufs wurden halbjährlich Kurzberichte erstellt, um den Projektfortschritt zu dokumentieren.

Dieser Abschlussbericht wird über den DBU auf dessen Webseite veröffentlicht.

Ergebnisdiskussion und Abweichungen von der Zielsetzung

Bezüglich Aufwand und Verarbeitbarkeit wird es nicht als sinnvoll eingeschätzt, die durchgeführten bzw. anvisierten Verarbeitungsschritte (Sammeln, Waschen, Vorzerkleinern, kryogenes Vermahlen, (Trocknen), Sieben, (Pelletieren), Extrudieren, Schmelzspinnen) separat voneinander durchzuführen. Es wird empfohlen, eine Recyclingstrecke bei einem Unternehmen aufzubauen, mindestens ab dem Vorzerkleinerungsschritt, um einerseits die Umwelt nicht mit vermeidbarer Logistik zu belasten. Zum anderen kann so die Qualität der Entstehungsprodukte besser auf den Nachfolgeprozess abgestimmt werden.

Die Anzahl der Verfahrensschritte sollte verringert werden, vor allem die Vorzerkleinerung und Feinzerkleinerung (stickstoffgespült) sowie der bisher notwendige Schritt des Pelletierens zur Erhöhung der Rieselfähigkeit des Materials (bspw. zum Befüllen von Extrusionsanlagen, welche auch im Industriemaßstab den o. g. Trichter mit Schnecke aufweisen). Die Extrusionsanlage sollte bestenfalls mit einem direkt daran angeschlossenen Schmelzspinnmodul ausgestattet sein.

Da es noch kein etabliertes Verfahren für die effektive Trennung und anschließende Wiederverwertung von Komponenten für Arbeitshandschuhe gibt, kann das Recycling derzeit noch nicht wirtschaftlich durchgeführt werden. Der aktuelle Stand der Technik muss verbessert werden, um das Produktionsniveau im Textilrecycling anzuheben. Eine direkte Nutzung der vorhandenen Technik für eine effektive Verwendung mit Textilien ist nur bedingt möglich, da die Maschinen baulich nicht auf die Verarbeitung von Textilien ausgerichtet sind (vornehmlich mit Blick auf Rieselfähigkeit, sowohl bei der Separation, Zerkleinerung und Trennung der Materialien). Sofern jedoch entsprechende Modifikationen durchgeführt wurden, scheinen die Verarbeitungsschritte geeignet für ein mechanisches Recycling beschichteter Textilien.

Bei einer Neuentwicklung bzw. Überholung der Produktherstellung beschichteter Handschuhe sollte darauf geachtet werden, so wenige Fremdbestandteile wie möglich in den Handschuh einzubringen. Dies kann bspw. bereits durch den Einsatz identischer Textilien für den Handschuhgrund und dessen Bündchen erfolgen.

Die Sortiervorgaben sollten dahingehend überarbeitet werden, dass verstärkt darauf geachtet wird, keinen Abfall oder Fremdhandschuhe in die Sammlung der zu recycelten Handschuhe zu geben, da diese Fremdstoffe in den Prozess einbringen und diesen stören.

Die verwendeten Reinigungsmittel und Waschanweisungen der Handschuhe sind nochmals zu untersuchen, um bestmögliche Ergebnisse bei der Reinigung von Fremdbestandteilen (Öle,

Lacke etc.) zu geben, wenn möglich mit Angreifen der Beschichtung zum Erleichtern des Ablösens vom Strickgrund.

Das Ziel, neues Garn aus Handschuh-Rezyklat herzustellen, konnte nicht erreicht werden. Das im Projekt erzeugte Granulat war jedoch trotz noch enthaltener Verunreinigungen spritzfähig. Es wurde auf eine Verwertung des Mahlgutes als Innenteil (Futter) für einen Kältehandschuh ausgewichen, welche jedoch noch optimiert werden muss, um den dafür geltenden Industriestandards zu genügen.

Folgende Gründe führten zu Problemen und Verzögerungen im Projekt:

- Lieferverzögerungen bei Lieferanten der Prüfmateriale (Handschuhe) aufgrund von Lieferantenwechsel. Durch Kurzarbeit in den Unternehmen, welche die Handschuhe nutzen, ist zudem weniger Material angefallen, das gewaschen und damit in den Recyclingprozess überführt werden konnte, woraus sich Zeitverzögerungen im Projektablauf ergaben.
- Es konnten nicht alle geplanten Waschverfahren umgesetzt werden, da es zum Zeitpunkt der Projektdurchführung keine in Deutschland ansässigen Anbieter für CO₂-Wäsche gab.
- Kryogenvermahlung der Handschuhe unterlag wegen der Materialbeschaffenheit (u. a. sehr hoher Agglomerationsneigung) einem höheren Aufwand für die Prozessoptimierung als ursprünglich angenommen.
- Das mechanische Trennen durch Windsichten hat sich als nicht umsetzbar erwiesen. Das Ausweichen auf Wirbelstromsieben war möglich, jedoch nur mit geringem Materialdurchsatz.
- Es konnte nicht genug Material mit geringer Störstoffbelastung für Schmelz- oder Granulierverfahren im Großmaßstab gesammelt werden.

Bewertung im Vergleich mit Stand der Technik

Das Waschen der gebrauchten Handschuhe führt zu einer wesentlichen Abfallreduktion. Es ist hierbei auf passende Waschmittel zu achten, welche verwendungsgemäß übliche Verunreinigungen (bspw. Öle) von der Handschuhoberfläche entfernen. Das resultierende Abwasser sollte keine Gefahr für die Umwelt darstellen.

Derzeit entstehen noch zu viele Emissionen durch den Transport der Handschuhe, vom Sammelpunkt über die Wäscherei bis zu den weiterverarbeitenden Unternehmen. Es wäre sinnvoll, die Verarbeitung, spätestens ab dem Zeitpunkt der Zerkleinerung des Materials, bestenfalls bis zur Ausspinnung zum Garn oder zumindest bis zur Granulatherstellung, an einem Standort durchzuführen.

Die im Projekt genutzte Kryogenvermahlung zur Versprödung der Beschichtung kann aufgrund des Einsatzes von Flüssigstickstoff energieintensiv sein. Herstellung, Transport und Einsatz des Stickstoffs können Treibhausgasemissionen verursachen. Eine möglichst effiziente Stickstoffnutzung ist daher von essenzieller Bedeutung.

Nach dem Wirbelstromsieben ist eine Herabsetzung der Störstoffe (NBR + Rest) in der Grobfraction erkennbar, jedoch ist das Gemisch nach nur einem Siebdurchgang nicht rein genug für eine Weiterverarbeitung auf einem Extruder (Störstoffanteil $\gg 1\%$, vgl. Abbildung 39).

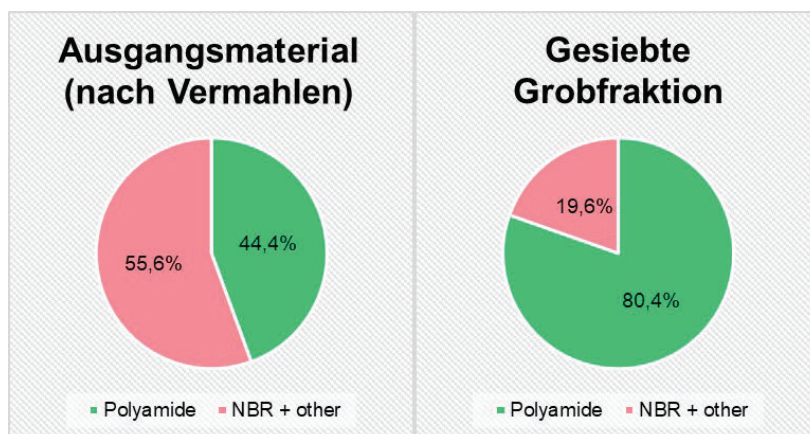


Abbildung 39: Störstoffgehalt vor und nach dem Wirbelstromsieben des Rezyklats

Es müssten mehrere Siebdurchläufe durchgeführt werden, was jedoch einen höheren Energieverbrauch nach sich zieht. Um dies zu vermeiden, muss das Wirbelstromsieben so effektiv wie möglich sein, vornehmlich durch Optimierung der Maschine auf textiles Siebgut.

Im Projekt waren ausschließlich Trockentrennverfahren geplant. Mittels Flotationsverfahren mit Wasser lässt sich der NBR-Anteil und der PA-Anteil nach einer kryogen Vermahlung jedoch besser trennen. Dieses Verfahren erfordert jedoch eine energieintensive Nachtrocknung und wurde erst nach Projektabschluss getestet.

Verbreitung der Vorhabenergebnisse

Eine Veröffentlichung der Ergebnisse fand bisher zur Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference im November 2024 in Stuttgart statt. Hier wurde an einer Posterpräsentation teilgenommen.

Die erarbeiteten Ergebnisse sollen darüber hinaus über Veröffentlichungen und Vorträge, sowie Messen (Techtex, JEC, Arbeitsschutzmessen, Recyclingfachmessen) und Kundenkontakte bekannt gemacht werden, um weitere Interessenten für das Verfahren zu finden.

Die Firma Seiz kann die gewonnenen Erkenntnisse auf weitere Kunden und Handschuhtypen übertragen und diese in Neuentwicklungen einbringen und bewerben.

Parallel erfolgt die Akquise weiterer Projekte zur Trennung beschichteter Textilabfälle durch die Hochschule Hof und die Barthmann Recycling GmbH, mit dem Ziel, die gewonnenen Erkenntnisse auf andere Textilien zu übertragen, Anwendungsmöglichkeiten für die Wertstoffe zu finden und diese in den Wertstoffkreislauf zurückzuführen. Weiterhin fließen die Erkenntnisse an der Hochschule Hof in die Lehre ein und werden in einschlägigen Fachmagazinen und online publiziert.

Fazit

Ausgangssituation	Erkenntnisse im Projekt	Möglichkeiten, um die Recyclingfähigkeit zu verbessern
Handschuh-Strickgarn primär Polyamid mit Elastan im Bündchen	In den bunten Größenmarkierungsstreifen sind noch Polyester oder Polyethylen enthalten	Ansatz der Sortenreinheit ist in den Konstruktionsvorgaben aufzunehmen und mit den Vorlieferanten die Spezifikation klären
Handschuh soll vor dem Recycling gewaschen werden	Nach dem im Mehrweghandschuhbereich üblichen Waschverfahren sind ölige Restverschmutzungen auf den Handschuhen	Waschverfahren muss für den Einsatz optimiert werden, ggf. anderer Waschmittelzusatz oder aufwändigeres Spülen; hier ist weiterer Versuchsaufwand erforderlich und die Alternative Chemische Reinigung
Kryogenvermahlung zur Ablösung der Beschichtung	Nach der Kryogenvermahlung haften tlw. noch NBR-Partikel an den Fasern, speziell an den Strickbereichen der Zwickel zwischen den Fingern, die auch nicht vollständig aufgetrennt sind.	Weitere Kryomahl-Versuche mit angepassten Parametern durchführen Zur Verbesserung des Effektes der Kryovermahlung wird bei Noll eine textilspezifisch angepasste Mühle aufgebaut, welche jedoch noch im Prototyp-Stadium ist
Reinheit der Trennverfahren für Schmelzverfahren	Die bisher durchgeführten Separationsversuche mit marktüblichen Trennverfahren haben noch keine ausreichende Reinheit des Polyamids erzielt (unter 1 % Fremdanteile vor der Schmelzfiltration)	Versuche zu kombinierten Separationsverfahren durchführen, vor allem Zerkleinerung mit direkter Siebung
Technischer Reifegrad der Kombinationsverfahren	Das Wirbelstromsieben hat noch keine ausreichende Reinheit des Polyamids erreicht (verklebte Teilchen, Einschlüsse in Knäul)	Anpassung der Lamelle, welches das Siebgut gegen den Siebkorb streift (bspw. durch Stift- oder Hakenform) um einen Kämmeffekt zu erzielen

Literaturverzeichnis

- AMSLER & FREY AG: *POLYAMID 6 : TECHNISCHES DATENBLATT*. URL https://www.amsler-frey.ch/resources/td_pa6.pdf. – Aktualisierungsdatum: 01.08.2016 – Überprüfungsdatum 25.08.2025
- ANDRITZ AG: *Erste automatisierte Sortier- und Recyclinganlage in Frankreich*. In: *Melliand Textilberichte* (2024), 2024/1, S. 11–12
- AUFBEREITUNGSTECHNOLOGIE NOLL GMBH: *KRYOGENVERMAHLUNG : KRYOGENVERMAHLUNG MIT DEMINO®. SO COOL WIE KEINE*. URL https://www.noll.eu/wp-content/uploads/2017/04/Verfahren_Kryogen_NOLL_PDF_D_2016.pdf – Überprüfungsdatum 08.06.2022
- AUFBEREITUNGSTECHNOLOGIE NOLL GMBH: *Kryogenvermahlung : Standard Verfahren*. URL <https://www.noll.eu/verfahren/kryogenvermahlung/>. – Aktualisierungsdatum: 01.03.2018 – Überprüfungsdatum 08.06.2022
- BASF SE: *Ultramid® (PA) : Product Range (Europe)*. URL https://download.basf.com/p1/8a8081c57fd4b609017fdf6c58512210/en/Ultramid%253Csup%253E%25C2%25AE%253Csup%253E_%2528PA%2529_%25E2%2580%2592_Product_Range – Überprüfungsdatum 25.08.2025
- BASF SE: *Unsere Technologie : Wir sind die ersten, die den Kreislauf für Nylon 6 aus Textilabfällen vollständig schließen*. URL <https://www.loopamid.com/global/de/technology> – Überprüfungsdatum 08.08.2025
- Der deutsche PSA-Markt 2021*. 2021
- HIERSIG, Heinz M. (Hrsg.): *Lexikon Maschinenbau*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1995
- HOYER, Stefan: *Neuartige Warmmahltechnologie zum Recycling von Elastomeren und Analyse prozessbedingter Eigenschaften*. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau. 14.03.2014
- LIBRA INDUSTRIES OF MICHIGAN, INC.: *Glove Cleaning & AbsorbPro : Use it, wear it, wash it! Balancing the Environment*. URL <https://www.librami.com/readysip-glove-and-ppe-recycling>. – Aktualisierungsdatum: 09.06.2022 – Überprüfungsdatum 09.06.2022
- MANIAN, Avinash P. ; BECHTHOLD, Thomas ; PHAM, Tung: *Auflösung und Rückgewinnung von Polyamid aus Fasermischungen für das Textilrecycling*. In: *Melliand Textilberichte* (2023), 2023/1, S. 18–20
- NOLTEWERK GMBH & CO. KG: *PA 6 E (Polyamid 6 extrudiert) : Technisches Datenblatt*. URL https://noltewerk.de/fileadmin/user_upload/D_Kunststofftechnik/Technische_Datenblaetter/TD_PA_6E_1015_DE.pdf – Überprüfungsdatum 25.08.2025
- PLASTTRADE PLASTIC SOLUTIONS: *PA6 : Technisches Merkblatt*. URL https://kunststoff-recycling.de/wp-content/uploads/2022/06/TDB_PA6.pdf#:~:text=E-Modul%20%28Biegeversuch%29%202800%20MPa%20ISO%20178%20Biegefestigkeit%20105,Schlagz%C3%A4higkeit%201eU%20ohne%20Bruch%20kJ%2Fm%C2%B2%20ISO%20179%2F1eU%20 – Überprüfungsdatum 25.08.2025

PLASTVERARBEITER.DE: *Wie ein Projekt Textilien durch mechanisches Recycling neu nutzbar macht*. URL <https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/kunststoffrecycling/wie-ein-projekt-textilien-durch-mechanisches-recycling-neu-nutzbar-macht-908.html> – Überprüfungsdatum 29.11.2024

POGRZEBA, Sahra: *Potential and bottlenecks of mechanical recycling of textile blends* (Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference). Stuttgart, 21.11.2024

PRUCKNER, Raphael: *TECHNOLOGY OFFER : Separation Process for Elastane from Textiles*. URL www.wtz-ost.at

RCT REICHELT CHEMIETECHNIK GMBH + CO.: *NBR - Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (Perbunan®)*. URL <https://www.rct-online.de/de/RctGlossar/detail/id/34>. – Aktualisierungsdatum: 09.06.2022a – Überprüfungsdatum 09.06.2022

RCT REICHELT CHEMIETECHNIK GMBH + CO.: *PA 6.6 - Polyamid 6.6*. URL <https://www.rct-online.de/de/RctGlossar/detail/id/7>. – Aktualisierungsdatum: 09.06.2022b – Überprüfungsdatum 09.06.2022

RETSCH GMBH: *KRYOGENE PROBENVORBEREITUNG LEICHT GEMACHT : AUSWAHL DER GEEIGNETEN LABORMÜHLE UND DES ZUBEHÖRS FÜR MAHLPROZESSE MIT TROCKENEIS ODER FLÜSSIGSTICKSTOFF*. URL <https://www.retsch.de/de/applikationen/wissensdatenbank/kryogene-probenvorbereitung/>. – Aktualisierungsdatum: 08.06.2022 – Überprüfungsdatum 08.06.2022

RVN FASERPRODUKTIONS GMBH, 95339 NEUENMARKT: *Recycling beschichteter Textilien*. Telefonat. 2022. (Adressat)

SCHRÖDER, Bernd: *Kunststoffe für Ingenieure : Ein Überblick*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014 (Essentials)

SEIZ INDUSTRIEHANDSCHUHE GMBH: *SEIZ Montagehandschuhe*. URL https://www.seiz.de/media/pdf/c2/c7/dc/Montagehandschuhe_202109_WEB.pdf – Überprüfungsdatum 09.06.2022

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geschlossene Kreislaufwirtschaft Soll-Ist-Vergleich (Grafik: vecteezy, Daimler Truck AG)	2
Abbildung 2: Zusammensetzung eines Montagehandschuhs von Seiz (Seiz Industriegeschuh GmbH 2021)	3
Abbildung 3: Verwertungspotential von Bekleidungs- und Haustextilien nach (2)	4
Abbildung 4: verschmutzte Handschuhe bei Seiz	4
Abbildung 5: Handschuh schneidgemahlen auf ca. 8 bis 10 mm	5
Abbildung 6: Schritte Recyclingverfahren	5
Abbildung 7: NBR-Reststoff vor (li.) und nach (re.) Verarbeitung im Warmmahlextruder (Quelle: TU Chemnitz, 2014)	7
Abbildung 8: Warmmahl-Pilotanlage (Quelle: TU Chemnitz, 2014)	8
Abbildung 9: Ausgabe- und Sammelstellen von Montagehandschuhen bei Fa. Daimler	12
Abbildung 10: CO ₂ -Fußabdruck von 1 Paar Arbeitshandschuhe mit Nitrilschaum	14
Abbildung 11: li.: Testflotte zur Kontaktwinkelmessung, re.: Flotte für Dünnschicht-Chromatographie	19
Abbildung 12: li. Handschuhe im Ganzen und schneidgemahlen, re.: Schneidsieb	20
Abbildung 13: Lieferung gewaschener Handschuhe bei Fa. Barthmann. li.: Fremdhandschuhe, mi.: stark verschmutzte Test-Handschuhe, re.: Fremdstoffe (Plastik, Cellose, Schaum)	20
Abbildung 14: Funktionsprinzip einer Prallstrom-mühle (Typ DemiNo®) der Aufbereitungstechnologie NOLL GmbH	21
Abbildung 15: Kryogenschnecke mit Prallstrommühle	21
Abbildung 16: Materialzuführung mit Schnecke	21
Abbildung 17: Inneres der Prallstrommühle (links) mit oberer Abdeckung (rechts)	22
Abbildung 18: Material, schneidgemahlen	22
Abbildung 19: Material, kryogen gemahlen	22
Abbildung 20: Mikroskopie der kryogen vermahlenen Proben nach einem Siebversuch im Labormaßstab	23
Abbildung 21: Fraktionen schneidgemahlenes Siebgut	23
Abbildung 22: Laborkrempel bei Spinnerei Neuhof, li.: Vorderseite, mi.: Rückseite, re.: gekämmtes Material	24
Abbildung 23: Vibrationssiebmaschine mit Ultraschallaufsatz	24
Abbildung 24: Gekämmtes Material (schwarz: NBR, gelb: PP/PES, weiß: EL)	25
Abbildung 25: Kämmstabdeckel Laborsieb	25
Abbildung 26: Luftstrahlsiebmaschine mit Kämmstabdeckel, Maschensieb und Zyklonbehälter	25
Abbildung 27: Fasern mit NBR-Resten	26
Abbildung 28: Sieb-Kardier-Versuch, einstufig, unterschiedliche Siebzeiten	26
Abbildung 29: Sieb-Kardier-Versuch, mehrstufig, unterschiedliche Siebe	26
Abbildung 30: re.: JEL Palafix, mi.: leerer Siebkorb, re.: Lamellenrotor ohne Stauscheibendeckel	27
Abbildung 31: Siebfraktionen Wirbelstrom	27
Abbildung 32: Doppelschneckenextruder „Process 16“ beim IKK, Hannover	29
Abbildung 33: li.: PA/NBR-Pellets, mi.: PA/NBR-Granulat, re.: PA/NBR-Spritzgussteil	30
Abbildung 34: Handschuhhalter der Fa. Seiz	31

Abbildung 35: durchgedrückte Beschichtung Innenseite.....	32
Abbildung 36: Gepresste Testplatten (ausgesiebte Fasern).....	33
Abbildung 37: li.: Förderband mit grauer Handschuh-Rezyklat und weißen Biko-Fasern, re.: Faserflor	34
Abbildung 38: Kälteschutzhandschuh mit Rezyklat-Vlieseinlage	35
Abbildung 39: Störstoffgehalt vor und nach dem Wirbelstromsieden des Rezyklats	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prüfplanung zur Produktkategorisierung.....	15
Tabelle 2: Bestandteile der Handschuhe	16
Tabelle 3: Vergleich der Eigenschaften von rPA mit PA6 für Extrusionsanwendungen	30



Friedrich Seiz GmbH | info@seiz.de | www.seiz.de