

# Abschlussbericht

zum DBU-Forschungsvorhaben

## KICKup

### Aufbau KI-gestützter geschlossener Kreisläufe für B2B-Textilien aus Baumwoll-Polyester-Mischungen auf der Basis chemischen Upcyclings

(AZ 38265/01-31)

Laufzeit: 01.01.2023 – 31.12.2024

durchgeführt von: Dibella GmbH  
Hamalandstr. 111  
46399 Bocholt



Projektleitung: Ralf Hellmann

in Kooperation mit: Hochschule Niederrhein (HSNR)  
Forschungsinstitut für Textil und Bekleidung (FTB)  
Webschulstr. 31  
41065 Mönchengladbach



und

Hochschule Reutlingen (HSRT)  
Reutlingen Research Institute (RRI)  
Lehr- und Forschungszentrum Process Analysis & Technology (PA&T)  
Alteburgstr. 150  
72762 Reutlingen



gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt



Bocholt im März 2025

An der Erstellung des Abschlussberichts haben mitgewirkt:

Ralf Hellmann<sup>1</sup>

Martijn Witteveen<sup>1</sup>

Carsten Ridder<sup>1</sup>

Dr. Esther Rohleder<sup>2</sup>

Dr. Michael Korger<sup>2</sup>

Prof. Dr.-Ing. habil. Maike Rabe<sup>2</sup>

Barbara Boldrini<sup>3</sup>

Prof. Dr. Karsten Rebner<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dibella GmbH, Bocholt



<sup>2</sup> Hochschule Niederrhein, Forschungsinstitut für Textil und Bekleidung (FTB),  
Mönchengladbach



<sup>3</sup> Hochschule Reutlingen, Reutlingen Research Institute (RRI), Lehr- und Forschungszentrum  
Process Analysis & Technology (PA&T), Reutlingen



## Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	9
2	Einführung / Motivation.....	11
3	Methodik / Vorgehensweise .....	12
4	Projektergebnisse.....	14
4.1	Auswahl und Spezifikation von Textil- und Fasermischungen (AP 1).....	14
4.2	Aufbau eines Netzwerks an Partnerfirmen für die Kreislaufführung von Flachtextilien (AP 2).....	15
4.3	Entwicklung eines Detektier- und Sortiersystems für Alttextilien (AP 3).....	18
4.3.1	Erarbeiten logistischer Prozesslösungen und Implementierung des Scan- und Steuerungssystems im Sortierprozess (AP 3.1 und AP 3.3) .....	18
4.3.2	Auswahl und Aufbau des Sortierprinzips für Alttextilien (AP 3.2) .....	21
4.3.3	Ausarbeitung eines logistischen Container- und Lagersystems (AP 3.4).....	25
4.3.4	Bestimmung der spektralen Signatur von Standard-Textil-Targets auf Basis von spektroskopischen und hyperspektralen Messungen (AP 3.5).....	27
4.3.5	Entwicklung von Modellen für die Klassifizierung und Quantifizierung der Textilien in Echtzeit (KI) (AP 3.6) .....	33
4.3.6	Demonstrator-Entwicklung: Testphase Sortierung und Implementierung des NIR-Detektiersystems (AP 3.7) .....	41
4.3.7	Validierung und Optimierung des Messsystems zur Klassifizierung und Quantifizierung der Textilien, Erarbeitung von Anforderungen und Restriktionen für eine industrielle Umsetzung (AP 3.8).....	43
4.4	Aufbau einer wiederholbaren Kreislauffähigkeit durch chemische Qualitätsbewertung (AP 4).....	46
4.4.1	Qualitätsbeurteilung von Cellulosefasern vor und nach Nutzungs- bzw. Waschzyklen (AP 4.1) .....	46
4.4.1.1	Abtrennung und physikalisch-chemische Charakterisierung des Celluloseanteils der untersuchten Textilien (AP 4.1.1).....	48
4.4.1.2	Bestimmung des Lösungsverhaltens und rheologischen Verhaltens von Celluloselösungen zur Eignung für Spinnversuche (AP 4.1.2).....	50
4.4.2	Abgleich/Korrelation der chemischen Analyse von Cellulose mit den spektros- kopischen Erkennungsdaten für die Textilsortierung (Materialvalidierung) (AP 4.2) .....	52
4.4.3	Entwicklung von Lösungen für eine weitere Recyclingfähigkeit durch „Design for Circularity“ (AP 4.3) .....	53
4.5	Entwicklung geeigneter Transaction Certificates inkl. Datenbankaufbau (AP 5).....	54

4.5.1	Anforderungen und Rahmenbedingungen .....	55
4.5.1.1	Anforderungen an Transaction Certificates.....	55
4.5.1.2	Technologische Grundlagen (RFID, Software) .....	56
4.5.1.3	Gesetzliche und regulatorische Anforderungen (z. B. EU-Vorgaben) .....	57
4.5.2	Entwicklung der Transaction Certificates.....	58
4.5.2.1	Definition der notwendigen Datenfelder für Transaction Certificates .....	58
4.5.2.2	Implementierung von RFID-Technologie zur Datenerfassung.....	58
4.5.2.3	Softwareentwicklung zur Verwaltung und Verarbeitung der Daten .....	58
4.5.3	Zusammenarbeit mit Recyclingunternehmen .....	59
4.5.3.1	Auswahl und Einbindung von Partnerunternehmen .....	59
4.5.3.2	Definition der Anforderungen an die Transaction Certificates seitens der Recyclingunternehmen .....	60
4.5.3.3	Prozesse zur Übermittlung und Verifizierung der Daten durch die Recyclingunternehmen .....	60
4.5.4	Datenbankaufbau und Integration.....	61
4.5.4.1	Konzeption und Struktur der Produktpass-Datenbank .....	61
4.5.4.2	Integration der RFID-Daten in die Datenbank .....	61
4.5.4.3	Sicherstellung der Datenqualität und -integrität.....	62
4.5.5	Logistische Prozessschritte.....	62
4.5.5.1	Ablaufbeschreibung der Erfassung und Speicherung von Alttextil- Informationen .....	62
4.5.5.2	Rückverfolgung der Produkte vom Textilservice bis zum Recycler .....	63
4.5.5.3	Prozessoptimierung und Automatisierung.....	63
4.5.6	Nachweis und Reporting .....	64
4.5.6.1	Erstellung von Berichten für Recycler und Textilservicebetriebe.....	64
4.5.6.2	Bestätigungen und Nachweise für fachgerechte Entsorgung .....	64
4.5.6.3	Berichterstattung.....	64
4.5.7	Ausblick und Weiterentwicklung .....	65
4.5.7.1	Weiterentwicklung der Transaction Certificates und RFID-Technologien .	65
4.5.7.2	Erweiterung des Systems auf weitere Produktkategorien .....	66
4.5.7.3	Perspektiven für die europäische und internationale Ausweitung.....	66
4.5.8	Lösungsvorschläge zur Verfolgung/Transparenz der Warenströme nach Sortierung.....	67

4.5.9	Aufbau der digitalen Plattform CIBUTEXCHANGE.....	76
4.6	Lebenszyklusanalyse (LCA) zur Evaluation eingesparter Logistikemissionen (AP 6).	80
5	Fazit und Ausblick des erreichten Entwicklungsstandes.....	81
6	Öffentlichkeitsarbeit .....	82
7	Danksagung .....	83
8	Anhang .....	84
9	Anlage (ifeu-Bericht) .....	88

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Hindernisse zum Kreislaufschluss der Produktion / des Warenflusses (Generation 2) von B2B-Mietwäsche-Textilien (Bsp. Bettwäsche PES : Lyocell (Refibra™) = 1:1) aus recycelten Rohstoffen. Der innovative Projektkern ist rot markiert. ....	11
Abbildung 2: Arbeits- und Zeitplan. ....	12
Abbildung 3: Zwei-Greiferprinzip des Sortierroboters (Inwatec ApS) mit Transportbandtechnologie: links oben 3D-Greifarm zum Aufheben des Textilstücks, Mitte unten starrer Greifarm zum seitlichen Wegziehen des Textilstücks und Ablegen auf das Transportband (Messestand Jensen-Group auf Texcare International 2024, Frankfurt). ....	19
Abbildung 4: Prinzipieller Workflow der maschinellen Textilsortierung für Antransport (A), Vereinzelung & selektive Weitergabe (B & C), (KI-NIR-) Detektion (D), Weiterförderung (E) und die kategorisierte Sammlung (F) der Alttextilien (Quelle: Inwatec ApS). ....	20
Abbildung 5: Zweistrahl-Spektrophotometer der Firma Perkin Elmer Lambda 1050 mit Ulbrichtkugel (Quelle HSRT). ....	27
Abbildung 6: Bei der diffusen Reflexionsmessung wird die Probe von einer Lichtquelle mit spektral aufgelöster Strahlung am Reflectance-Port durchstrahlt. Das von der Probe reflektierte Licht wird in der Ulbrichtkugel gesammelt und von Detektoren im Inneren der Kugel gemessen (Quelle: HSRT). ....	28
Abbildung 7: FT-NIR-Spektrophotometer der Firma Perkin Elmer Frontier mit Zubehör für die kollimierte Transmission (Quelle: HSRT). ....	28
Abbildung 8: Messanordnung der kollimierten Transmission. ....	28
Abbildung 9: NIR-Spektrum von CO 100% Textilgewebe und Bandenzuordnung. ....	29
Abbildung 10: NIR-Spektrum von 100% PES Textilgewebe und Bandenzuordnung. ....	30
Abbildung 11: NIR-Spektrum von Mischgewebe 50% CO/50%PES: in Blau (•) sind die Absorptionsbanden von CO bezeichnet, in Rot (*) die Banden von PES. ....	30
Abbildung 12: NIR-Spektrum von 100% CO (blau, Gewebe) und 100% Cellulose regenerat (rot, Fasern). ....	31
Abbildung 13: NIR-Spektrum der Probe B2 in diffuser Reflexion (links) und kollimierter Transmission (rechts). ....	31
Abbildung 14: Frontal- (links) und Seitenansicht (rechts) der 4/1-Satinbindung für die Musterprobe B2. ....	32
Abbildung 15: Förderband der Hochschule Reutlingen mit integrierter Hyperspektralkamera und Beleuchtungskonzept (Quelle: HSRT). ....	32
Abbildung 16: Sensoraufnahme als Falschfarbendarstellung in NIR des Trainingsdatensatzes aller Textilproben. Rot: Referenzmaterialien, Blau: Bettwäsche; Grün: Handtücher und Arbeitshose. ....	33
Abbildung 17: Scoreplot (links) und Loadingsplot (rechts) der ersten 2 Hauptkomponenten. ....	34
Abbildung 18: Scatterplot des PLS-Modells zwischen Referenz- und Messwerten für Baumwolle. ....	35

Abbildung 19: Scatterplot des PLS-Modells zwischen Referenz- und Messwerten für Polyester. ....	35
Abbildung 20: Scatterplot des PLS-Modells zwischen Referenz- und Messwerten für Tencel™.....	36
Abbildung 21: Score-Scatterplot (links) und Image-Scoreplot (rechts) der ersten Hauptkomponente.....	36
Abbildung 22: Scatterplot des PLS-Modells zwischen Referenz- und Messwerten für Baumwolle.....	37
Abbildung 23: Scatterplot des PLS-Modells zwischen Referenz- und Messwerten für Polyester. ....	38
Abbildung 24: Scatterplot des PLS-Modells zwischen Referenz- und Messwerten für Tencel™.....	38
Abbildung 25: Implementierung des NIR-Labormesssystems in die Sortiermaschine. Links: Gesamtaufbau mit Kamera, Beleuchtung und Steuerrechner. Mitte: Details der Beleuchtung. Rechts: Übersicht des Sortiersystems (Quelle: HSRT). ....	41
Abbildung 26: Testmessungen von Textilien in der Sortieranlage von Inwatec ApS. Links: Kissenbezug. Rechts: Bettwäsche (Quelle: HSRT). ....	42
Abbildung 27: Beispielmessungen von Textilien in der Sortieranlage von Inwatec ApS. ....	42
Abbildung 28: Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse (PCA). ....	44
Abbildung 29: Überblick der gemessenen Textilien nach Segmentierung mit der entsprechenden Klassenzuordnung. ....	44
Abbildung 30: REM-Aufnahmen der ungewaschenen, 30-mal gewaschenen (inkl. vorher jeweils genutzten) und bis zu 100-mal gewaschenen Probe B7 (50% Refibra, 50% PET). ....	46
Abbildung 31: FTIR-Spektren der im Projekt verwendeten Ausgangsmaterialien Baumwolle, Lyocell (links) und PET (rechts), sowie die Zuordnung der wichtigsten Signale der Spektren zu den Stoffen. ....	47
Abbildung 32: Normierte FTIR-Spektren der Probe B7, a) ungewaschen, b) 30-mal gewaschen, c) 100-mal gewaschen. ....	47
Abbildung 33: Möglichkeiten zur Trennung von cellulosischen und Polyester (PET)-Bestandteilen (Quelle: Römpp, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 81, 91–95, 2001). ....	49
Abbildung 34: a) Kapillare zur Bestimmung der Grenzviskosität, b) PET-Reste von B7 nach dem Herauslösen der Cellulose, c) PET-Reste von B4 nach Herauslösen der Cellulose, d) lichtmikroskopische Aufnahme der Cuoxam-„Lösung“ von B4x0 (ungewaschen) mit Faserbruchstücken und Gelpartikeln (Quelle: FTB). ....	49
Abbildung 35: a) Cuoxamlösung vor und nach Entfernung des PET, b) Cuoxamlösung (pH 6-7), c) „Cuoxamlösung“ (pH 3-4), d) „Cuoxamlösung“ (pH 3-4) mit gefälltter Cellulose (Quelle: FTB).....	50
Abbildung 36: Mikroskopische Aufnahmen von a) gefälltter Baumwolle und b) unlöslichem Rückstand, c) FTIR-Spektrum des unlöslichen Rückstands (B1x0_insoluble) im Vergleich zu Baumwolle (B1x0_CO) und Lyocell. Senkrechte Striche: Beispiele für übereinstimmende Signale in den Spektren. ....	50
Abbildung 37: Überblick beteiligter Organisationen der Lieferkette zur gemeinsamen Datennutzung (Quelle: Präsentation von Datamars Textile ID für CIBUTEX). ....	56
Abbildung 38: Darstellung verschiedener Phasen der Nachverfolgung in der kreislaufbasierten Textilwirtschaft (Quelle: CIBUTEX).....	59
Abbildung 39: Web-Produktinformationen zum Beispielartikel „Napkin Satin White“ mit Respect-Code 685RUA0GA (Quelle: <a href="https://www.respect-code.org/product/685RUA0GA">https://www.respect-code.org/product/685RUA0GA</a> ). ....	68
Abbildung 40: Beispieldarstellung weiterer Details eines Produktionsschrittes (hier Rohstoffe mit Herkunft) in Respect-Code. ....	69
Abbildung 41: Beispieldarstellung mit Angaben zum Recycling in Respect-Code. ....	69
Abbildung 42: Modellgrundlage von „bAwear“ zur ökologischen Impactberechnung inkl. Industrieräscheleasing (Usage) und Recycling (Quelle: <a href="https://bawear-score.com/methodology/">https://bawear-score.com/methodology/</a> ). ....	71
Abbildung 43: Beispieldarstellung eines Umweltauswirkungs-Berichts nach „bAwear“ (Quelle: Präsentation für CIBUTEX). ....	72
Abbildung 44: Informationen zum Beispielprodukt „E-bike“ in der Cirmar-Plattform (Quelle: Präsentation für CIBUTEX). ....	75
Abbildung 45: Daten zu den Umweltauswirkungen des Beispielprodukts „E-bike“ in der Cirmar-Plattform (Quelle: Präsentation für CIBUTEX). ....	75
Abbildung 46: Erfassung recycelbarer Textilien durch die digitale Plattform CIBUTEXCHANGE: Eingabe von Erstinformationen (Quelle: CIBUTEX). ....	78

Abbildung 47: Erfassung recycelbarer Textilien durch die digitale Plattform CIBUTEXCHANGE: Auswahl von Materialdetails (Quelle: CIBUTEX). .....	78
Abbildung 48: Erfassung recycelbarer Textilien durch die digitale Plattform CIBUTEXCHANGE: Auswahlmöglichkeit von Recyclingunternehmen (Quelle: CIBUTEX). .....	79

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Von Dibella zur Verfügung gestellte Standardmuster und deren Spezifikationen. ....	14
Tabelle 2: Standardtextilien der Firma wfk-Testgewebe GmbH und deren Zusammensetzung. ....	15
Tabelle 3: Angabe der wichtigsten Kategorien von Textilzusammensetzungen (Materialien I + II), die für die Sortierung eindeutig erkannt werden sollen. ....	20
Tabelle 4: Übersicht über die verwendeten Desktopspektrometer und die verwendeten Einstellungen. Mit $\lambda$ = Wellenlänge, res = Auflösung, D = Spaltbreite, $t_{int}$ = Integrationszeit, $\nu$ = Wellenzahl und $n$ = Anzahl an Spektren. ....	29
Tabelle 5: Spezifikationen des hyperspektralen Imaging-Systems. ....	33
Tabelle 6: Optimierungsmetriken für die verwendete Klassifizierungsalgorithmen des maschinellen Lernens. .	39
Tabelle 7: Vergleich der Klassifizierungsmodelle des maschinellen Lernens und der PLS-DA. ....	39
Tabelle 8: Konfusionmatrix für die Klassifizierung mittels maschinellen Lernens. ....	40
Tabelle 9: Vergleich der Quantifizierungsmodelle des maschinellen Lernens und der PLS-Regression. ....	40
Tabelle 10: Vergleich der Root-Mean-Square-Error-Fehlerkennzahlen (RMSE) für die Vorhersage des maschinellen Lernens und der PLS-Regression. ....	40
Tabelle 11: Zusammensetzung der gemessenen Textilien im August 2024. ....	43
Tabelle 12: Optimierungsmetriken für die verwendeten Klassifizierungsalgorithmen des maschinellen Lernens. ....	45
Tabelle 13: Konfusionmatrix für die Klassifizierung mittels maschinellen Lernens. ....	45
Tabelle 14: Klassenvorhersagen für den Test-Datensatz. ....	46
Tabelle 15: Durchschnittlicher Polymerisationsgrad (DP) des Celluloseanteils der Proben gemessen nach D. Klemm et al. ....	51
Tabelle 16: Einfluss von silikonhaltigen Weichgriffmitteln auf die Löslichkeit der Materialien in Cuoxam. ....	51

## Abkürzungen

ATR (engl.)	attenuated total reflection (abgeschwächte Totalreflexion)
CO	Baumwolle
DP	Durchschnittspolymerisationsgrad
DPP	Digitaler Produktpass
EDX	energy dispersive X-ray spectroscopy (energiedispersive Röntgenspektroskopie)
EMSC (engl.)	extended multiplicative scattering correction
EPR	Extended Producer Responsibility (erweiterte Herstellerverantwortung)
ERP	Enterprise Ressource Planning
FT	Fourier-Transform(ation)
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektroskop(ie)
KI	Künstliche Intelligenz
MVA (engl.)	multivariate analysis (multivariate Datenanalyse)
NIR	Nahinfrarot
NL	Niederlande
PCA (engl.)	principal component analysis (Hauptkomponentenanalyse)
PES, PET	Polyester, Polyethylenterephthalat
PLS-DA	partial least squares discriminant analysis (partielle kleinste Quadrate-Diskriminanzanalyse)
REM	Rasterelektronenmikroskop(ie)
RFID	radio frequency identification
RMSE	root mean square error (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers)
rPES, rPET	recyceltes Polyester, recyceltes Polyethylenterephthalat
SNV	Standard Normal Variate
TC	Transaction Certificate bzw. Tencel™
UHF	ultra-high frequency (Ultrahochfrequenz)

## 1 Zusammenfassung

In diesem Vorhaben konnten erfolgreich die Komponenten eines industriell umsetzbaren Detektier- und Sortiersystems für die in der Textilservicebranche für Flachwäsche relevanten Alttextilien aus verschiedenen Mischungsanteilen Cellulose und Polyester ausgearbeitet und entwickelt werden. Für die Detektionseinheit erfolgte zunächst die NIR-spektroskopische Identifizierung textiler Materialproben unterschiedlicher Faserzusammensetzung im Labormaßstab, welche die Unterscheidung von Polyester, Cellulose als Baumwolle und Cellulose als Celluloseregenerat (z. B. Lyocell) in ausreichender Genauigkeit erlaubt. Unter Verwendung eines Aufbaus mit einer NIR-Hyperspektralkamera (kontaktloses Linien-Scan-Verfahren für Flächen in schneller Bewegung) und Kombination mit KI (Methode der multivariaten Datenanalyse) konnte daraufhin die gewünschte Materialidentifizierung in Echtzeit realisiert und validiert werden. Die Korrelationen zwischen den tatsächlichen und vorhergesagten Materialanteilen sind ausreichend hoch und die Fehlergrenzen mit  $< 10\%$  akzeptabel, um die angestrebte Textilkategorisierung nach Materialzusammensetzung vornehmen zu können. Diese Technologie wurde in einen mit der Fa. INWATEC ApS konzipierten Workflow inkl. Greifer- und Transporttechnik für die automatisierte Anlieferung, Vereinzelung, Sortierung und kategorisierten Sammlung der Alttextilien implementiert. Der Demonstrator als Textilvereinzelungs- und Sortieranlage mit integrierter und optimierter Kamera- und Beleuchtungseinheit beweist die Skalier- bzw. Einsatzmöglichkeit in industrieller Umgebung bei den dort vorherrschenden Transportgeschwindigkeiten. Validierungsläufe bestätigen darüber hinaus die Robustheit und Zuverlässigkeit der entwickelten KI-Vorhersagemodelle (nahezu 100%) für eine erfolgreiche Textilkategorisierung.

Für die begleitende chemische Qualitätsbewertung der cellulosischen Faseranteile konnten diese in den Materialproben erfolgreich abgetrennt werden. Für die Proben mit Baumwoll- und Lyocellanteilen wurden über 100 Waschzyklen hinweg durchschnittlich ausreichend hohe Durchschnittspolymerisationsgrade ( $DP > 500$ ) mit nur geringem Kettenabbau ermittelt, so dass diese als Regeneratfaseranteile einem Faser-zu-Faser-Recycling zugeführt werden können. Die recycelte Refibra<sup>TM</sup>-Faser wies in der ungewaschenen Probe bereits einen DP von nur etwa 350 auf, so dass hier weitere Recyclingstrategien wie z. B. als Ausgangsmaterial für mikrokristalline Cellulose, Ethanol oder sogar Wasserstoff zu betrachten sind.

Für die Umsetzung eines effektiven Recyclingsystems wurden im Austausch mit Textilservicebetrieben Sortierkonzepte erarbeitet, um je nach den Anforderungen und Kapazitäten der Betriebe Kosten und Emissionen zu optimieren (Einsatz grober Vorsortierung, gefolgt von einer brancheneigenen automatisierten Feinsortierung, dezentrale vs. zentrale Sortierung). Hinsichtlich der Transportlogistik wurden grundlegende Daten erhoben und evaluiert, welche Vor- und Nachteile sich beim Einsatz einer Ballenpresse bzw. eines innovativen Klappboxsystems aus 100% recycelten Materialien als Lagersystem für die Textilfraktionen ergeben. Die klaren Vorteile einer Ballenpresse sind die signifikante Reduzierung des Transportvolumens sowie von Verpackungsmaterialien und damit die ökologischen Vorteile mit weniger Emissionen. Diese Lösung rentiert sich vor allem für größere Betriebe mit einer

hohen Alttextilmenge als Recyclinggut. Nach ökologischer Bilanzierung einer Auswahl von vier Transportmedien ergibt sich zudem, dass der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck vom Transport selbst dominiert wird und gepresste Ballen gegenüber Transportboxsystemen aus Klimaschutzsicht wegweisend sind, da sie eine hohe LKW-Auslastung bis zu 80% (gegenüber ca. 40%) ermöglichen.

Für die Verfolgung der Textilwarenströme wurde die digitale Plattform CIBUTEXCHANGE erstellt und in Betrieb genommen, welche die zu recycelnden Waren in einer Datenbank erfasst und eine nahtlose Integration von RFID-Technologie und automatisierten „Transaction Certificates“ (TCs) ermöglicht. Zur Abbildung der Lieferkettentransparenz, ökologischen Impactberechnung und Erstellung eines digitalen Produktpasses wurden speziell für Textilien geeignete Softwaretools identifiziert (Respect-Code, bAwear bzw. Cirmar), die sich kombiniert in die übergeordnete Anlaufplattform einbetten lassen, damit der Recyclingprozess effizient, transparent und konform mit den Anforderungen der Kreislaufwirtschaft erfolgen kann.

## 2 Einführung / Motivation

B2B-Textilien, wie sie z. B. als Flachwäsche (Bettwäsche, Tischwäsche, Frottierwäsche) oder Arbeitsbekleidung (z. B. Kasacks und Kittel) in industriellen Wäschereien (Textilleasing-service) bearbeitet werden, können nach Ende ihrer Nutzungsphase einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung und Umweltentlastung beitragen, wenn diese wiederum in einen Fasereinsatz zurückgebracht werden. Die vornehmlich aus Baumwoll-Polyestermischungen bestehenden Textilien tragen großenteils keine Schadstoffe aus, sind mit entsprechenden Produkt-Datenblättern versehen und entsprechen bereits heute den ökologischen Qualitätskriterien des Grünen Knopfes. Sie werden bisher schon in größeren Mengen einem Downcycling-Prozess (z. B. zu Putztüchern, Dämmmaterialien) unterworfen, jedoch befinden sich die Umwandlung in ein zirkuläres textiles Wertschöpfungs-system und der damit erforderliche „Close-The-Loop-Prozess“ noch am Anfang. Hierfür fehlt es an ökologisch und ökonomisch rentablen Lösungen zur selektierten Sammlung und Aufbereitung größerer textiler Stoffströme für schon existierende Recyclingprozesse.

Für den Auf- und Ausbau einer zirkulären Textil- und Bekleidungswirtschaft (siehe Abbildung 1) soll im Rahmen des Projekts KICKup der Lückenschluss zwischen dem Lebensende eines Produkts und seinem Recycling zu neuen Fasern durch Optimierung der Stoffströme am Beispiel von B2B-Textilien aus Cellulosefasern bzw. aus Mischungen von Cellulose- und Polyesterfasern erforscht werden.

### Produktion / Warenfluss Generation 2 (recycelte Rohstoffe)

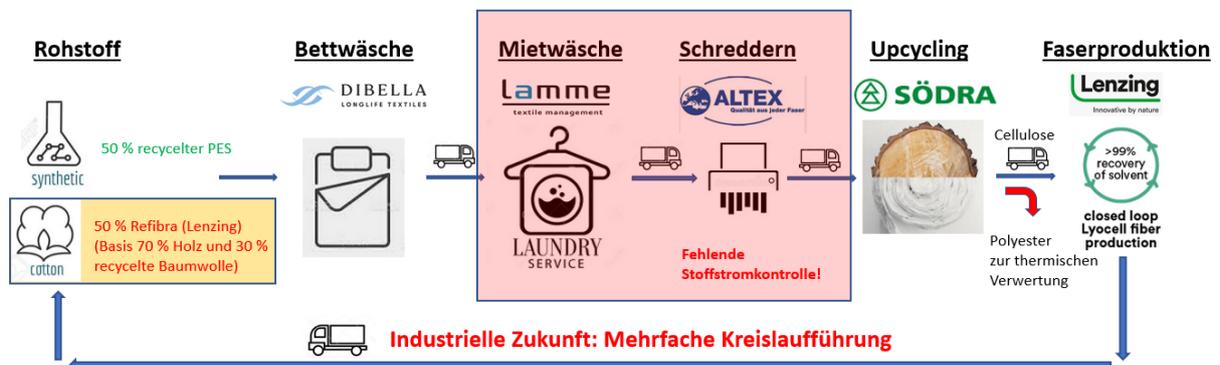


Abbildung 1: Darstellung der Hindernisse zum Kreislaufschluss der Produktion / des Warenflusses (Generation 2) von B2B-Mietwäsche-Textilien (Bsp. Bettwäsche PES : Lyocell (Refibra™) = 1:1) aus recycelten Rohstoffen. Der innovative Projektkern ist rot markiert.

Hierbei werden folgende Aspekte erarbeitet:

- Sicherstellung definierter und mengenmäßig großer Alttextilströme über automatisierte und robotergestützte Sortierprozesse mit Einsatz KI-gestützter NIR-Detektionstechniken
- Separation der Textilien in den Textilservicebetrieben zur Lieferung vorsortierter Stoffströme, die aus definierbaren Cellulose-Materialanteilen zusammengesetzt sind, durch Ausarbeitung eines für die anfallenden Alttextil-Kapazitäten geeigneten Warentransport- und Greifer-/Trennverfahrens

- Erarbeitung einer Transportlogistik zu den Recyclingunternehmen, um die Transparenz der Warenströme zu gewährleisten (einschließlich Transaction Certificates)
- Konzeption von Lösungen für eine tatsächliche Kreislaufführung von B2B-Textilien am Nutzungsende auf Basis von chemischen Qualitätsbewertungen und neuer technischer „Design for Circularity“-Ansätze
- Lebenszyklusanalyse (LCA) zur Evaluation und Datenanalyse ausgewählter Transportlogistikoptionen mit Identifikation des ökologischen Benefits

### 3 Methodik / Vorgehensweise

Arbeitspakete (AP)	Partner	W = Workshop M = Meilenstein																								
		Zeitraum (24 Monate)																								
Projektmonat		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	alle																									
2	Dibella				W						W					W								W		
3	Dibella, VEGA, HSRT, FTB																									
3.1	VEGA																									
3.2	Dibella, VEGA, FTB												M1													
3.3	VEGA																							M2		
3.4	Dibella																								M2	
3.5	HSRT																									
3.6	HSRT												M1													
3.7	Dibella, VEGA, HSRT																								M2	
3.8	Dibella, VEGA, HSRT, FTB																									
4	FTB, HSRT																									
4.1	FTB																									
4.1.1	FTB												M1													
4.1.2	FTB																									
4.2	FTB, HSRT																								M2	
4.3	FTB																									
5	Dibella																									
6	Dibella																									

Abbildung 2: Arbeits- und Zeitplan.

In der Gesamtprojektlaufzeit von 24 Monaten wurden gemäß Arbeitsplan folgende Schritte unternommen:

- Auswahl der zu betrachtenden Textilwaren mit unterschiedlicher Materialzusammensetzung (Polyester, Baumwolle, Cellulosegenerat) für ein nach Dibella repräsentativ signifikantes Spektrum an Flachtextilien inkl. erforderlicher Referenzmaterialien für die gewünschte Textilerkennung (AP 1)
- Ansprache von Textilservicebetrieben aus unterschiedlichen Einsatzbereichen (Gesundheitswesen, Hotel, Arbeitskleidung) bzgl. Projektvorhaben zur Lösungsfindung von Sortierung und Rückführung von Alttextil-Warenströmen sowie Netzwerkausbau durch Zusammenschluss mit zentralen Organisationen zur Etablierung einer kreislauffähigen und zugleich wirtschaftlich tragfähigen Textildienstleistungsbranche (AP 2)
- technische Konzeption eines in der Praxis durchführbaren, automatisierten Workflows zur Sortierung von Alttextilmengen inkl. Vereinzelung (Roboter mit 3D-Greifarm) und kategorisierter NIR-Detektion (AP 3.1)

- Festlegung des Sortierprinzips für Alttextilien (Vorsortierung, Abwägung zentral vs. dezentral, zugeschnitten auf die Textilservicebranche) (AP 3.2) und Zusammenführung aller entwickelten Technologien zu einem industriell praktikablen Sortierprozess (AP 3.3)
- Ausarbeitung und Bewertung eines in ökonomischer und ökologischer Hinsicht effizienten logistischen Container- und Lagersystems für die Textilwäschereien (maßgeschneiderte Lösungen, Einsatz von Ballenpresse bzw. Klappboxsystemen) (AP 3.4)
- Bestimmung spektraler Signaturen verschiedener Modelltextilien bekannter Zusammensetzung auf Grundlage von NIR-spektroskopischen und hyperspektralen Messungen in Laborumgebung zur eindeutigen Erkennung anvisierter Materialfraktionen (AP 3.5)
- KI-gestützte Entwicklung von Modellen für die Klassifizierung und Quantifizierung der Textilien in Echtzeit für die Textilsortierung in der Praxis (AP 3.6)
- Aufbau eines Demonstrators für den automatisierten Textilsortierprozess (von Textilvereinzelung bis zur kategorisierten Sammlung) mit Integration des entwickelten KI/NIR-Labormesssystems in die Sortieranlage und Vorstellung auf der Messe *Texcare International – Weltmarkt moderner Textilpflege* (6.-9. November 2024, Frankfurt am Main) (AP 3.7)
- Optimierung des NIR-Hyperspektralkamerasystems und Anpassung an die Messgeometrie in industrieller Umgebung (u. a. Auflösung/Bildrate, Geschwindigkeit, Beleuchtung) mit anschließender Validierung (AP 3.8)
- Qualitätsbeurteilung und Analyse der verschiedenen Faseranteile der untersuchten Textilproben vor und nach Waschzyklen mit Lichtmikroskop-, REM- und FTIR-Aufnahmen sowie Abtrennung des Celluloseanteils (AP 4.1.1)
- Chemische Qualitätsbewertung (durchschnittlicher Polymerisationsgrad, DP) des celluloseischen Faseranteils der untersuchten Textilproben für Bewertung der möglichen Wiederverwendbarkeit des Regeneratfaseranteils (Eignung für Spinnversuche) (AP 4.1.2)
- Materialvalidierung durch Abgleich der chemischen Analyse von Cellulose mit den NIR-spektroskopischen Erkennungsdaten für die Textilsortierung (AP 4.2)
- Erarbeitung möglicher Lösungen für eine tatsächliche und wiederholte Kreislaufführung (der verschiedenen Cellulosearten) von B2B-Textilien am Nutzungsende auf Basis entwickelter technischer „Design for Circularity“-Ansätze (AP 4.3)
- Entwicklung geeigneter „Transaction Certificates“ (inkl. Softwarelösungen für die Lieferkettentransparenz, ökologische Impactberechnung und den digitalen Produktpass) zur Information der Recyclingunternehmen (Identifikation Post-Consumer-Abfall, Herkunft, Zusammensetzung, Chemieeinsatz) mit Bereitstellung der digitalen Plattform CIBUTEXCHANGE zur zentralen Erfassung aller relevanten Produktdaten (AP 5)
- Lebenszyklusanalyse (LCA) für verschiedene Möglichkeiten von Transportlösungen beim Textilrecycling zur Identifizierung minimaler Logistikemissionen und einer aus ökonomischer sowie ökologischer Sicht effizienten Transportlogistik (ifeu GmbH) (AP 6)

## 4 Projektergebnisse

### 4.1 Auswahl und Spezifikation von Textil- und Fasermischungen (AP 1)

In enger Abstimmung und Zusammenarbeit aller Projektpartner wurden die zu untersuchenden Textilien diskutiert und festgelegt. Die Auswahl der Textilien erfolgte vor allem aus Produkten, die Dibella in großer Stückzahl sammeln kann, so dass sich eine Sortierung hierfür auch ökonomisch lohnt. Es handelt sich um drei Textilmaterialien in reiner Form oder in Mischungen: Polyester (PES) bzw. Polyethylenterephthalat (PET), Baumwolle (CO) und Cellulose regeneriert (Lyocell, von der Lenzing AG als Marke Tencel™ oder Refibra™). Die Firma Dibella stellte Standardmuster der Textilien zur Verfügung, und zwar sowohl reine Materialien als auch eine Auswahl möglicher Mischgewebe. Die ausgewählten Muster stellen einen umfassenden Querschnitt der von der Firma Dibella verarbeiteten Bettwäsche dar. Zur Ergänzung weiterer Mischungsverhältnisse wurden auch Handtücher (H1 und H2), sowie eine Arbeitshose inkludiert (WW1). Eine Übersicht der Standardmuster und deren Spezifikationen ist in Tabelle 1 gelistet.

Tabelle 1: Von Dibella zur Verfügung gestellte Standardmuster und deren Spezifikationen.

Probe	Name	Zusammensetzung			Gewicht g/m <sup>2</sup>	Garnfeinheit – Fäden/cm	Farbe	Dessin	Bindung	Ausrüstung
B1	Tioba-Fair	100% CO Bio			145	Nm 68x68 – 62x38	weiß	Plain Satin	Satin 4/1	merzerisiert, sanforisiert
B2	Villach	80% CO/ 20% PES	Kette: 100% CO	Schuss: 50% CO/ 50% PES	150	Nm 68x68 – 62x38	weiß	Plain Satin	Satin 4/1	merzerisiert, sanforisiert
B3	Philadelphia	60% Tencel/ 40% CO			150	Nm 68x68 – 62x38	weiß	8 mm Satin Stripes	Satin 4/1	merzerisiert, sanforisiert
B4	DeLuxe	50% CO/ 50% PES			140	Nm 68x68 – 55x35	gelb	20 mm Satin Stripes	Satin 4/1	merzerisiert
B5	Vinci	50% CO/ 50% PES			140	Nm 68x68 – 55x35	weiß	1,5 mm Satin Stripes	Satin 4/1	merzerisiert
B6	Lindau Light	50% CO/ 50% PES			145	Nm 50x50 – 43x28	weiß	27 mm Satin Stripes	Satin 4/1	merzerisiert
B7	LindauLyo	50% Refibra/ 50% rPES			145	Nm 50x50 – 30x20	weiß		Leinwand 1/1	
B8	Treviso Doubleface	60% CO/ 40% PES			135	Nm 20x20 – 55x55	diamant & grau		Leinwand 1/1	kochfest chlor- beständig
B9	ALM-"recycle"	80% CO/ 20% rPES	Kette: 100% CO	Schuss: 50% CO/ 50% PES	150	Nm 20x20 – 66x62	weiß		Leinwand 1/1	
B10	Lagos	70% CO/ 30% PES	vorne CO	hinten PES	155	Nm 30	weiß		plattiert	
H1	Tokio	90% CO/ 10% PES	Kette/ Flor 100 % CO	Schuss: 50% CO/ 50%PES	420	Kette Nm 34/2 Schuss Nm 27 Flor Nm 27	weiß		Leinwand	

<b>H2</b>	Imola	80% CO/ 20% PES			360	Kette Nm 20 Schuss Nm 27 Flor Nm 27	blau		Leinwand	
<b>WW1</b>	„Arbeitschose“	50% Lyocell/ 50% rPES					weiß		Leinwand	

Die Proben B1 bis B4 liegen sowohl als Neuware als auch als gewaschene (aber ungebrauchte) Proben mit jeweils 1 bzw. 100 Waschzyklen vor. Die Probe B7 liegt im Neuzustand, 30-mal genutzt und gewaschen und nachträglich bis 100-mal gewaschen vor. Nach den Wäschen wurde die Probe 7 jeweils gemangelt. Alle anderen Muster sind neu.

Zur Erweiterung des Datensatzes und zur Verbesserung der statistischen Auswertung wurden von der HSRT zusätzliche Referenzmaterialien der Firma wfk-Testgewebe GmbH in die Messungen einbezogen (siehe Tabelle 2).

*Tabelle 2: Standardtextilien der Firma wfk-Testgewebe GmbH und deren Zusammensetzung.*

Bezeichnung	Zusammensetzung
<b>MRF-0003</b>	PES/CO = 65/35 Gewebe, Leinwand, mit Aufheller, 125 g/m <sup>2</sup>
<b>MRF-0008</b>	PES-Gestrick, mit Aufheller, 135 g/m <sup>2</sup>
<b>MRF-0012</b>	Standard-Polycotton-Jersey-Textil, PES/CO = 50/50, weiß gebleicht
<b>Ref10</b>	CO = 100% Textil, DIN 53919/ISO 2267
<b>Ref13</b>	CO = 100% Gewebe, Köper, DIN 61621
<b>Ref20</b>	PES/CO = 65/35 Polycotton-Textil
<b>Ref27</b>	PES/CO = 65/35 Trägergewebe
<b>Ref30</b>	PES = 100% Textilgewebe

#### **4.2 Aufbau eines Netzwerks an Partnerfirmen für die Kreislaufführung von Flachtextilien (AP 2)**

Im Rahmen des Projekts KICKup wurden von Dibella bedeutende Schritte zur Bildung eines Netzwerks mit verschiedenen Organisationen unternommen, um die Kreislaufführung von Flachtextilien zu fördern. Zu den kontaktierten Organisationen gehören MaxTex ([www.maxtex.eu](http://www.maxtex.eu)) und CIBUTEX ([www.cibutex.eco](http://www.cibutex.eco)) sowie Branchenverbände wie der Deutsche Textilreinigungs-Verband (DTV) in Deutschland ([www.dtv-deutschland.org](http://www.dtv-deutschland.org)), FTN in den Niederlanden ([www.brancheorganisatieftn.nl](http://www.brancheorganisatieftn.nl)) sowie belgische und schwedische Textilservice-Branchenverbände. Es fanden regelmäßige Gespräche und allgemeine Diskussionen über Kreislaufkonzepte im Textilservice statt. Diese Verbände stehen auch in Kontakt mit weiteren Organisationen und Regierungsstellen.

Eine branchenweite Lösung für die Kreislaufführung von Textilien existiert derzeit noch nicht; vielmehr verfolgen Marktteilnehmer individuelle Lösungsansätze.

Die intensivsten Dialoge im Rahmen des Projekts KICKup wurden mit CIBUTEX geführt. CIBUTEX strebt danach, sich als eine führende Branchenlösung im europäischen Kontext für die Kreislaufführung und Recycling von B2B Textilien zu etablieren. Die Organisation umfasst sowohl führende Textilservicebetriebe als Mitglieder als auch eine Reihe von Partnern, die nicht direkt dem Textilservicebereich angehören. Seit der Gründung im Mai 2022 hat CIBUTEX bereits über 550.000 kg End-of-Life-Textilien einem hochwertigen Recycling zugeführt. Ein Großteil dieser Textilien wurde zum chemischen Recycling weitergeleitet.

CIBUTEX hat sich bereits erfolgreich mit führenden Unternehmen des Textilservice-Marktes in Deutschland und Österreich vernetzt. Zu den bemerkenswerten Mitgliedern gehören Sitex – Textile Dienstleistungen aus dem Gesundheitsbereich ([www.sitex.de](http://www.sitex.de)), MEWA Textilservice SE & Co. Management OHG für Berufsbekleidung ([www.mewa.de](http://www.mewa.de)) und die Greif Textilservice GmbH & Co. KG für den Hotelbereich ([www.greif-mietwaesche.de](http://www.greif-mietwaesche.de)). In Österreich ist die Marktführerin SALESIANER MIETTEX GmbH ([www.salesianer.at](http://www.salesianer.at)) ebenfalls Teil dieses Netzwerks. Diese Partnerschaften verdeutlichen die Bedeutung von CIBUTEX als eine zentrale Plattform für die Kreislaufwirtschaft in der Textilbranche.

CIBUTEX hat erfolgreiche direkte Gespräche mit den genannten führenden Unternehmen des Textilservice-Marktes in Deutschland und Österreich geführt, in denen das KICKup-Projekt mit seinen Zielen vorgestellt wurde. Diese direkten Interaktionen sind ein wichtiger Schritt, um branchenweite Kooperationen und Strategien im Bereich der Kreislaufwirtschaft für Textilien zu stärken und voranzutreiben.

Während der Mitgliederversammlung von CIBUTEX (10./11. Mai 2023) wurden in intensiven zweitägigen Gesprächen die Herausforderungen und Chancen der Kreislaufführung von Textilien eingehend diskutiert. Diese Diskussionen zeigen das starke Engagement der beteiligten Akteure, um effektive Lösungen und Strategien für das Recycling von Textilien zu entwickeln und umzusetzen.

Während der Messe medlogistica (16./17. Mai 2023, Leipzig) hat CIBUTEX in Zusammenarbeit mit dem Mitgliedsunternehmen Sitex Kontakte zum deutschen Gesundheitswesen aufgebaut. Es fanden diverse Gespräche mit Krankenhäusern und Kliniken statt, die das zunehmende Interesse an der textilen Kreislaufwirtschaft widerspiegeln. Besonders in Anbetracht der durch Corona bedingten Versorgungsengpässe gewinnen wiederverwendbare und recyclingfähige Textilien an Bedeutung. Für Sitex ist es daher entscheidend, kreislauffähige Textilien zu nutzen, die am Ende ihrer Lebensdauer sortierbar sind.

Am 14. November 2023 fand das erste größere Treffen des Deutschen Textilreinigungsverbands e. V. (DTV) zum Thema Kreislaufwirtschaft statt, das DTV-Forum Textilrecycling. Neben den Gesprächen mit Mitgliedern des DTV kam es auch zu einem Kontakt mit Herrn Dr. Neyers, dem Präsidenten der European Textile Services Association (ETSA) ([www.textile-services.eu](http://www.textile-services.eu)), welche die Interessen der europäischen Textildienstleistungsbranche vertritt und sich für sie einsetzt. Dr. Neyers, der u. a. bei der AlSCO Berufsbekleidungs-Service GmbH tätig ist, zeigte großes Interesse an einem weiteren Austausch, so dass CIBUTEX im April 2024 der ETSA als Mitglied beitrug. Beide Organisationen können so durch gegenseitige

Unterstützung nach einer kreislauffähigen, nachhaltigen und gleichzeitig wirtschaftlich tragfähigen Textildienstleistungsbranche streben.

Am 14. und 15. November 2023 fand das Mitgliedertreffen des Vereins Maxtex statt. Die fortlaufenden und intensiven Gespräche seit 2022 haben dazu geführt, dass CIBUTEX zunehmend als strategischer Partner für das Kickup-Projekt angesehen wird. Diese Entwicklung unterstreicht die Bedeutung von CIBUTEX in der Zusammenarbeit mit wichtigen Akteuren der Branche zur Förderung der Kreislaufwirtschaft in der Textilindustrie.

In den Branchengesprächen wurden zentrale Themen wie Personalmangel, der Automatisierungsgrad der Sortierung und anderer Prozesse sowie das Spannungsfeld zwischen besserer Kreislauffähigkeit und Wirtschaftlichkeit der Textilprodukte adressiert. Ein Konsens über die Notwendigkeit einer Kreislaufwirtschaft ist erkennbar, doch die Herangehensweisen variieren. Während einige Partner innovative Automatisierungs- und Sortierungstechniken favorisieren, konzentrieren sich andere auf traditionelle Methoden und die Verbesserung der Textilprodukte für eine längere Haltbarkeit. Diese Diskussionen sind essenziell, um ein tiefgreifendes Verständnis für die verschiedenen Herausforderungen und Möglichkeiten in der Branche zu entwickeln und diverse Modelle für die Kreislaufwirtschaft zu evaluieren.

Im Februar 2024 stellten Ralf Hellmann und Jan Lamme auf der Berlin Fashion Week während des Seminars „The Future of Fashion“ in einer Diskussionsrunde das CIBUTEX-Circularity-Modell vor und erläuterten, wie dieses Modell zum Übergang von einer linearen zu einer zirkulären Textilindustrie beiträgt. Es galt zu erkunden, wie die Kreislaufwirtschaft die Textilindustrie umgestaltet, innovative Lösungen zu entdecken, sich mit Experten zu vernetzen und den Weg für nachhaltige Mode zu ebnen.

Am 6. Juni 2024 veranstaltete CIBUTEX seine zweite Mitgliederveranstaltung bei Spinning Jenny B.V. in Nijverdal (NL). Auf dem Programm standen Besichtigungen vor Ort und von Frankenhuis B.V. in Almelo (Textilrecycling), eine Reihe von Präsentationen von Sprechern des Netzwerks und Sprechern gleichgesinnter Organisationen (Circular Plastics Alliance, Denim Deal) sowie ein interaktiver Workshop, der allen Teilnehmern die Möglichkeit bot, ihre Beiträge und Visionen einzubringen.

Als wichtiger Schritt ist anzusehen, dass CIBUTEX ab September 2024 im Rahmen der erweiterten Herstellerverantwortung (EPR) mit Collectief Circulair Textiel (CCT) ([www.collectiefcirculairtextiel.nl/en/](http://www.collectiefcirculairtextiel.nl/en/)) zusammenarbeitet – einer Initiative der Umweltorganisation Fair Resource Foundation, welche die EPR für Textilien in den Niederlanden umsetzt. Damit gewinnt man eine Erzeugerorganisation, welche die Nachhaltigkeit wirklich in den Mittelpunkt stellt und mit Erzeugern, Sammlern, Recyclern, Kommunen und anderen Akteuren zusammenarbeitet, um textile Kreislaufwirtschaft zu gestalten. Dieses Kollektiv wird dafür sorgen, dass es einen maßgeschneiderten Ansatz für den B2B-Textilfluss von EPR-Textilien geben wird. Dieser unterscheidet sich sowohl in Bezug auf die Kollektion als auch auf die Zusammensetzung stark von den Verbrauchertextilien.

Generell lässt sich feststellen, dass seitens der Industrie und der Verbände großes Interesse besteht, kreislauffähige und sortierbare Produkte zu entwickeln. Eine zukunftsweisende

Technik der Sortierung würde auf großes Interesse stoßen. Für die Zukunft ist geplant, das Netzwerken innerhalb der Branche weiter durch Projekte zu vertiefen und zu konkretisieren, wobei die Implementierung der im Projekt fokussierten Technologien im Vordergrund steht.

### **4.3 Entwicklung eines Detektier- und Sortiersystems für Alttextilien (AP 3)**

#### **4.3.1 Erarbeiten logistischer Prozesslösungen und Implementierung des Scan- und Steuerungssystems im Sortierprozess (AP 3.1 und AP 3.3)**

##### **Auswirkungen der VEGA-Insolvenz auf das Projekt**

Die Insolvenz des Projektpartners VEGA stellte eine bedeutende Herausforderung für das Fortschreiten des Projekts dar. VEGA spielte eine Schlüsselrolle in der Entwicklung der Sortiertechnik für Alttextilien, und ihr Ausfall brachte den Projektfortschritt ins Stocken. Bereits vor der Insolvenzmeldung waren die Kommunikationsprozesse mit VEGA schleppend, was zusätzliche Hindernisse für eine effiziente Projektarbeit schuf.

Die Verzögerungen, die durch die Insolvenz von VEGA entstanden, hatten aufschiebende Auswirkungen auf den Zeitplan des Projekts. Als zentraler Partner für die Sortiertechnik war ihre Rolle im Projekt nicht nur fundamental, sondern auch einzigartig, was ihre plötzliche Abwesenheit umso problematischer machte.

##### **Anpassungen und Weiterführung des Projekts**

In Reaktion auf die Insolvenz von VEGA und die daraus resultierenden Herausforderungen wurden proaktiv Schritte unternommen, um die Fortführung des Projekts zu sichern. Ein entscheidender Schritt in dieser Richtung war die Kontaktaufnahme mit der JENSEN-GROUP ([www.jensen-group.com](http://www.jensen-group.com)), einem führenden und innovativen Unternehmen im Bereich der Wäschereitechnik. Die JENSEN-GROUP ist bekannt für ihre fortschrittlichen Lösungen in der Automatisierung, einem Bereich, der in der Branche aufgrund von Personalmangel zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Eine Schlüsselkomponente dieser neuen Partnerschaft ist die Zusammenarbeit mit Inwatec ApS ([www.inwatec.dk](http://www.inwatec.dk)), einem dänischen Unternehmen, das sich auf hochwertige Produkte für Großwäschereien spezialisiert hat. Inwatec, mit seinem Hauptsitz in Odense, Dänemark, und aktiv in mehr als 25 Ländern, bietet ein beeindruckendes Produktportfolio, das von Mattenrollmaschinen über Röntgenmaschinen bis hin zu Sortier- und Verteilsystemen reicht. Mit 30 Mitarbeitern weltweit hat sich Inwatec als ein zentraler Akteur in der Automatisierung von Wäschereiprozessen etabliert.

Die Expertise von Inwatec im Bereich der Automatisierung ergänzt die bestehenden Angebote der JENSEN-GROUP und bildet eine Brücke zur Industrie 4.0. Durch diese Partnerschaft profitiert Dibella von Inwatecs Kernkompetenzen, welche die Fähigkeiten in der Entwicklung des Detektier- und Sortiersystems für Alttextilien wesentlich erweitern. Mit einem Anteil von 70% an Inwatec unterstreicht die JENSEN-GROUP ihre strategische Positionierung und ihren Fokus auf innovative Technologien.

Diese neue Partnerschaft mit der JENSEN-GROUP und Inwatec ermöglicht es, die entstandene Lücke durch den Ausfall von VEGA nicht nur zu schließen, sondern auch einen Schritt weiter zu gehen. Sie bietet Zugang zu fortschrittlicheren Technologien und Expertise, was eine deutliche Steigerung der Effizienz und Innovation in diesem Projekt verspricht.

### **Konzeption und Realisierung einer Prozesslösung für die Alttextilsortierung**

Bei der Ausarbeitung eines Workflows für die Sortierung der Alttextilien nach maschineller Detektion und Identifikation hinsichtlich Materialzusammensetzung hat man sich zusammen mit Inwatec auf folgende Prozessabfolge festgelegt: Nach Anlieferung der Alttextilwaren werden diese mittels eines Sortierroboters mit einem 3D-Greifarm vereinzelt, der automatisch die Wäschetextilien aus dem geballtem Wäschehaufen von unten nach oben herauspickt. Auch Großteile können damit gehoben werden. Möglich macht dies der Einsatz eines kameragesteuerten 3D-Greifarms, der auch schwere Textilstücke selektiv mithilfe von Transportbändern sicher greifen und anheben kann (siehe Abbildung 3).



*Abbildung 3: Zwei-Greiferprinzip des Sortierroboters (Inwatec ApS) mit Transportbandtechnologie: links oben 3D-Greifarm zum Aufheben des Textilstücks, Mitte unten starrer Greifarm zum seitlichen Wegziehen des Textilstücks und Ablegen auf das Transportband (Messestand Jensen-Group auf Texcare International 2024, Frankfurt).*

Anschließend wird das Einzelteil von einem weiteren, jedoch starren Greifer seitlich weggezogen, der mit höherer Geschwindigkeit arbeitet und die Großteile so innerhalb kurzer Zeit auf ein Förderband ablegen kann, welches das Textil weiter zum neu entwickelten Scanner-system transportiert. Hier erfolgt die Kategorisierung des Einzeltextils mittels der KI-gesteuerten NIR-Kamera, bei welcher die Signalkennungen für die verschiedenen Materialzusammensetzungen in einer Datenbank hinterlegt sind. In der Regel ist zur Fremdkörpererkennung noch ein Röntgendetektorsystem vor- oder nachgeschaltet, um störende Fremtteile (Kugelschreiber, Skalpelle o. Ä.) aus den Textilstücken entfernen zu können. Letztlich wird das Textil über ein Kaskaden-Förderband selektiv zu dem entsprechenden Lagercontainer transportiert, welcher der Kategorie des ausgewählten Textilstücks entspricht.

In folgender Abbildung 4 ist der Workflow mit den einzelnen Stufen bildlich dargestellt.



Abbildung 4: Prinzipieller Workflow der maschinellen Textilsortierung für Antransport (A), Vereinzeln & selektive Weitergabe (B & C), (KI-NIR-) Detektion (D), Weiterförderung (E) und die kategorisierte Sammlung (F) der Alttextilien (Quelle: Inwatec ApS).

Als Grundlage soll sich bei der maschinellen Textilerkennung auf die für Großwäschereien mit dem Fokus Flachtextilien wichtigsten Material- bzw. Faserzusammensetzungen konzentriert werden. Damit ergeben sich die auch für Recyclingunternehmen abzugrenzenden in Tabelle 3 beschriebenen und bedeutenden Textilkategorien.

Tabelle 3: Angabe der wichtigsten Kategorien von Textilizusammensetzungen (Materialien I + II), die für die Sortierung eindeutig erkannt werden sollen.

Kategorie	Material I	Anteil in % ( $\pm 10\%$ )	Material II	Anteil in % ( $\pm 10\%$ )
A	Baumwolle	100		
B	Baumwolle	80	Polyester	20
C	Baumwolle	50	Polyester	50
D	Baumwolle	35	Polyester	65
E	Lyocell	50	Polyester	50
F	Lyocell	60	Baumwolle	40
G	Polyester	100		

Der erfolgreiche Sortierprozess der Textilwaren mit Vereinzelung und Detektion wurde im November 2024 auf der Messe Texcare International in Frankfurt präsentiert. Im Internet ist zudem die vollautomatische Sortierung und Kategorisierung von Textilien mithilfe von KI in einem Video anzusehen:

<https://www.kickup.eco/2025/03/20/projektupdate-die-sortierung-der-textilien/>.

#### **4.3.2 Auswahl und Aufbau des Sortierprinzips für Alttextilien (AP 3.2)**

Das Hauptziel dieses Arbeitsschrittes ist die Entwicklung und Implementierung eines einheitlichen Sortierprinzips für Alttextilien, das für die Mehrheit der Textilservicebetriebe anwendbar ist. Dieses Prinzip soll auf einem vollautomatischen Prozess basieren, der die Alttextilien nach ihrer Fasermischung detektiert und sortiert, um sie anschließend sortenrein in Boxen oder Silos zu befördern.

Aus den in Kapitel 4.2 dargestellten Firmengesprächen wurden wertvolle Informationen und Erkenntnisse über die verschiedenen Problematiken der Sortierung in den Unternehmen gewonnen. Diese Informationen wurden dokumentiert und analysiert, um die praktische Umsetzbarkeit verschiedener Sortieransätze zu bewerten. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Möglichkeit einer groben Vorsortierung, die direkt am Arbeitsplatz in der Wäscherei erfolgen kann.

#### **Grobe Vorsortierung für effizientes Recycling und deren Bedeutung**

In der Branche existiert derzeit kein einheitliches System für die Vorsortierung von Alttextilien. Jedoch erweist sich eine grobe Vorsortierung im Betrieb als sinnvoll und praktikabel. Ein wesentliches Hindernis bei der Sortierung ist oft der Mangel an ausreichendem Platz, um die verschiedenen Textilfraktionen effizient zu separieren. Dies hat zur Folge, dass viele Textilserviceunternehmen sich für eine einfachere, wenn auch weniger nachhaltige Methode der Entsorgung entscheiden.

Externe Aufkäufer von Alttextilien bieten den Textilserviceunternehmen Container mit Wechselbrücken an, die regelmäßig abgeholt und ausgetauscht werden. Diese Methode des Downcyclings von Alttextilien ist für die Textilserviceunternehmen unkompliziert und bringt zudem einen finanziellen Ertrag, der über dem Materialwert beim chemischen Recycling liegt. Allerdings führt diese Art der Entsorgung nicht zu einem geschlossenen Kreislauf, sondern verbleibt in einem linearen Geschäftsmodell.

In diesem Projekt stellt sich die Frage, ob und wie eine effektivere Kreislaufführung implementiert werden kann. Hierbei spielt die Entwicklung eines effizienten Vorsortierungssystems eine wesentliche Rolle. Dieses System sollte nicht nur auf die Kreislauffähigkeit der Textilien abzielen, sondern auch praktikabel und platzsparend in der Umsetzung sein, um den Betrieben eine realistische und wirtschaftlich vorteilhafte Alternative zu bieten. Es geht darum, einen nachhaltigeren Ansatz zu fördern, der über die gegenwärtige Praxis des Downcyclings hinausgeht und zur Schließung des Kreislaufs im Textilservice beiträgt.

Die vorgeschlagene Vorsortierung lässt sich in zwei Hauptfraktionen unterteilen:

### 1. Sortierung für chemisches Recycling

- **Weißer Textilien ohne „Hard Parts“:** Aktuell können im chemischen Recyclingprozess hauptsächlich weiße Textilien ohne harte Bestandteile wie Knöpfe oder Reißverschlüsse verarbeitet werden. Etiketten und RFID-Chips hingegen stellen kein Problem dar. Dies sollte daher die erste Sortierstufe darstellen.
- **Sortierung nach Zusammensetzung:** Eine weitere Sortierstufe konzentriert sich auf die Zusammensetzung der Textilien. Für die Gewinnung von Cellulosepulp für Lyocell erzielt man die besten Ergebnisse mit reinen Baumwollartikeln. Mischgewebe mit bis zu 50% Polyesteranteil wie bei Flachwäsche, Bettwäsche, Tischwäsche und Frottierwaren bilden eine weitere Kategorie.

### 2. Sortierung von Berufsbekleidung (BK) für mechanisches Recycling

- **PSA (Persönliche Schutzausrüstung):** Diese muss thermisch verwertet werden und bildet eine separate Kategorie.
- **BK ohne „Hard Parts“:** Hierzu zählen beispielsweise OP-Kasacks und Hosen, die ohne „Hard Parts“ wie Knöpfe oder Reißverschlüsse verarbeitet werden.
- **BK mit „Hard Parts“:** Berufsbekleidung mit harten Bestandteilen erfordert eine separate Recyclinganlage und bildet daher eine eigene Fraktion.
- **Sortierung nach Farben:** Eine zusätzliche Sortierung nach Farben (weiß oder gefärbt wie bei Blaumännern) könnte die Feinsortierung weiter beschleunigen.

Diese Vorsortierung könnte die Feinsortierung signifikant beschleunigen, da sie bereits im Vorfeld eine klare Trennung der unterschiedlichen Textilien ermöglicht. Im Bereich der Berufsbekleidung (BK) überwiegt das Mischgewebe mit hohem Polyesteranteil, während Artikel mit höherem Baumwoll- oder Lyocellanteil kaum noch eingesetzt werden. Die präzise Trennung dieser Materialien ist für die Effizienz des Recyclingprozesses von entscheidender Bedeutung.

### Analyse der Vor- und Nachteile einer zentralen bzw. dezentralen Sortierung von Alttextilien

#### Vorteile der zentralen Sortierung

- **Effizienzsteigerung durch Spezialisierung:** Zentrale Sortierzentren können sich auf spezialisierte Ausrüstung und Fachwissen konzentrieren, was zu einer effizienteren und qualitativ hochwertigeren Sortierung führt.
- **Skaleneffekte:** Größere Mengen in einem zentralen System können Kostenvorteile durch Skaleneffekte erzielen, insbesondere in Bezug auf Ausrüstung, Personal und Logistik.
- **Einheitliche Qualitätssicherung:** Ein zentrales System ermöglicht eine konsistentere Überwachung und Qualitätssicherung der Sortierprozesse.

- **Zentrale Datensammlung und -analyse:** Es erleichtert die Sammlung und Analyse von Daten zur Optimierung des gesamten Recyclingprozesses.

#### Nachteile der zentralen Sortierung

- **Höhere Logistikkosten:** Der Transport der Alttextilien zu einem zentralen Standort kann kostspielig und logistisch aufwändig sein.
- **Umweltauswirkungen:** Längere Transportwege führen zu höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen.
- **Abhängigkeit von einem einzigen Standort:** Zentralisierung kann zu Verwundbarkeiten führen, bspw. bei technischen Ausfällen oder lokalen Problemen.

#### Vorteile der dezentralen Sortierung

- **Nähe zum Ursprungsort:** Die Sortierung erfolgt in unmittelbarer Nähe zum Entstehungsort der Alttextilien, was Transportkosten und -zeiten reduziert.
- **Reduzierte Umweltauswirkungen:** Kürzere Transportwege bedeuten in der Regel geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen.
- **Flexibilität:** Dezentrale Systeme können schneller auf Änderungen in der Zusammensetzung der Textilien oder in den lokalen Anforderungen reagieren.
- **Förderung lokaler Wirtschaftskreisläufe:** Dezentrale Sortierung kann lokale Arbeitsplätze schaffen und die lokale Wirtschaft unterstützen.

#### Nachteile der dezentralen Sortierung

- **Geringere Effizienz und Qualität:** Ohne spezialisierte Ausrüstung und Expertise kann die Sortierqualität variieren.
- **Höhere Kosten pro Einheit:** Kleinere Mengen können zu höheren Kosten pro sortierter Einheit führen, da Skaleneffekte weniger genutzt werden können.
- **Schwierigkeiten bei der Standardisierung:** Unterschiedliche Verfahren an verschiedenen Standorten können zu Inkonsistenzen in der Qualität und im Recyclingprozess führen.
- **Komplexere Datenverwaltung:** Die Sammlung und Analyse von Daten kann bei vielen dezentralen Standorten komplizierter sein.

Die Entscheidung zwischen einer zentralen und einer dezentralen Sortierung hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie den spezifischen Bedingungen und Anforderungen der Branche, den verfügbaren Ressourcen, der geografischen Verteilung der Alttextilien und den übergeordneten Zielen. Es ist wichtig, diese Aspekte sorgfältig abzuwägen, um eine effiziente und nachhaltige Lösung zu finden.

## Analyse der Vor- und Nachteile der Sortierung von Alttextilien in der Textilservicebranche in Eigenregie

### Vorteile der Sortierung in Eigenregie in der Branche

- **Kontrolle und Anpassungsfähigkeit:** Die Branche hat volle Kontrolle über den Sortierprozess und kann diesen flexibel an ihre spezifischen Bedürfnisse anpassen.
- **Branchenspezifische Optimierung:** Die Sortierung kann genau auf die besonderen Eigenschaften und Anforderungen der in der Branche verwendeten Textilien zugeschnitten werden.
- **Direkte Einflussnahme auf Qualität:** Durch die direkte Verantwortung für den Sortierprozess kann die Branche die Qualitätssicherung effektiver steuern und optimieren.
- **Gemeinsame Investitionen und Ressourcennutzung:** Die Bündelung von Ressourcen und Investitionen kann zu Kosteneinsparungen und effizienterem Ressourceneinsatz führen.
- **Stärkung der Branche als Ganzes:** Ein gemeinsamer Ansatz kann die Solidarität und Kooperation innerhalb der Branche stärken und zu nachhaltigeren Praktiken führen.

### Nachteile der Sortierung in Eigenregie in der Branche

- **Hoher Koordinationsaufwand:** Die Abstimmung und Konsensfindung zwischen verschiedenen Akteuren der Branche kann komplex und zeitaufwändig sein.
- **Ungleiche Ressourcenverteilung:** Nicht alle Unternehmen verfügen über die gleichen finanziellen oder technischen Möglichkeiten, was zu Ungleichheiten bei der Umsetzung führen kann.
- **Risiko von Interessenskonflikten:** Unterschiedliche Interessen und Ziele innerhalb der Branche können zu Konflikten führen, die die Umsetzung erschweren.
- **Investitionsrisiken:** Die gemeinsame Investition in Sortierinfrastruktur und -technologie birgt finanzielle Risiken, insbesondere bei sich ändernden Marktbedingungen oder technologischen Entwicklungen.
- **Abhängigkeit von Branchendynamik:** Die Effektivität des Sortierprozesses kann von der Stabilität und Kooperationsbereitschaft innerhalb der Branche abhängen, was bei Veränderungen zu Problemen führen kann.

Die Entscheidung, ob und wie die Textilservicebranche die Sortierung von Alttextilien in Eigenregie übernehmen sollte, hängt von einer sorgfältigen Abwägung dieser Vor- und Nachteile ab. Dabei spielen Faktoren wie die aktuelle Marktsituation, die technologische Entwicklung sowie die Bereitschaft zur Kooperation und gemeinsamen Investitionen innerhalb der Branche eine entscheidende Rolle. Das Anfallen definierter, einheitlicher Alttextilströme mit im Textilservice im Vergleich z. B. zur Modebranche spricht jedoch deutlich für eine Favorisierung der branchenspezifischen Sortierlösung.

Das angestrebte Sortierprinzip der Alttextilien besteht demnach aus einer gezielten Vorsortierung der Textilwaren, der eine brancheneigene automatisierte Feinsortierung folgt (siehe vorheriges Kapitel 4.3.1). Die Abwägung zwischen zentraler und dezentraler Sortierung in den Betrieben muss auf einer Analyse interner Kapazitäten (z. B. Investitionsmöglichkeiten, Umschlagsmengen) beruhen.

### **4.3.3 Ausarbeitung eines logistischen Container- und Lagersystems (AP 3.4)**

Zunächst wurde mit Datenerhebungen begonnen, die in Zusammenarbeit mit CIBUTEX auf Informationsaustausch mit etwa 20 Textilservicebetrieben beruhen, darunter kleine, mittlere und große Unternehmen. Bei der Überprüfung verschiedener Container- und Lagersysteme offenbart sich eine wichtige Erkenntnis: Es gibt derzeit keine universelle, einheitliche Lösung für diese Systeme. Stattdessen dominieren maßgeschneiderte Lösungen, die spezifisch auf die Anforderungen und Bedürfnisse einzelner Betriebe zugeschnitten sind. Dieser Ansatz hat sowohl Vor- als auch Nachteile:

#### **Vorteile maßgeschneiderter Lösungen**

- **Anpassung an spezifische Bedürfnisse:** Sie können speziell für die einzigartigen Anforderungen eines Betriebs entwickelt werden, was zu besserer Effizienz und Effektivität führt.
- **Flexibilität:** Maßgeschneiderte Systeme können flexibel an Veränderungen im Betrieb oder in den Geschäftsprozessen angepasst werden.
- **Optimierung von Arbeitsabläufen:** Sie ermöglichen eine Optimierung der internen Prozesse und Arbeitsabläufe, was zu Kosteneinsparungen und gesteigerter Produktivität führt.

#### **Nachteile maßgeschneiderter Lösungen**

- **Höhere Kosten:** Die Entwicklung und Implementierung maßgeschneiderter Systeme kann teurer sein als die Anwendung standardisierter Lösungen.
- **Längere Implementierungszeit:** Maßgeschneiderte Lösungen erfordern in der Regel längere Planungs- und Implementierungsphasen.
- **Komplexität bei Wartung und Support:** Individuelle Systeme können komplexer in Wartung und Support sein, insbesondere wenn spezielle Kenntnisse erforderlich sind.

#### **Mögliche Weiterentwicklungen**

- **Modulare Systeme:** Entwicklung von modularen Lösungen, die an verschiedene Betriebe angepasst werden können, ohne eine vollständig maßgeschneiderte Entwicklung zu benötigen.

- **Etablierung von Branchenstandards:** Förderung von Branchenstandards, um eine gewisse Einheitlichkeit zu schaffen, die aber dennoch genügend Flexibilität für individuelle Anpassungen lässt.
- **Technologieintegration:** Nutzung von fortschrittlichen Technologien wie KI und Automatisierung, um bestehende Lösungen zu verbessern und die Effizienz zu steigern.

Die Diskussionen mit Recyclern über die Anlieferung von Textilien und die Rückmeldungen von CIBUTEX-Mitgliedern zeigen wichtige Aspekte auf, die bei der Planung und Umsetzung eines effektiven Recyclingsystems für Textilien berücksichtigt werden müssen. Als Lösung für das Lagersystem bieten sich entweder die **Ballenpresse** als das zurzeit wohl effektivste Mittel oder der Einsatz von **zusammenklappbaren Boxen** aus 100% Recyclingmaterialien als innovative Lösung für Unternehmen mit begrenztem Platzangebot an.

Das Verpressen der Textilien in Ballen auf Paletten ermöglicht die Erhöhung der Transporteffizienz (Frachtkostenreduktion) sowie eine schnelle und raumeffiziente Entladung und Lagerung bei den Recyclinganlagen. Eine Mehrfachnutzung der Pressen für Bündelung/Recycling von Plastikfolien/Pappe ist gegeben. Ballenpressen mit Mehrkammersystemen ermöglichen das gleichzeitige Verpressen verschiedener, grob vorsortierter Materialien (Effizienzerhöhung durch Wegfall manueller Umsortierung). Für Nachteile wie erhöhter Personalaufwand durch das Bedienen der Ballenpressen oder zusätzlicher Platzbedarf durch die Pressen sind Lösungen zu identifizieren (Einsatz (teil)automatisierter Ballenpressen, Investition in kompaktere/raumeffizientere Presssysteme).

Der Einsatz von Boxen, die zusammenklappbar sind, bringt eine große Platzersparnis beim Kunden bzw. Recycler, eine gute Stapelfähigkeit zur Verbesserung der Transporteffizienz und Lagerungsmöglichkeiten sowie eine Zeitersparnis bei Überführung der Alttextilien in den Verarbeitungsprozess (leichte Kippbarkeit der Boxen) mit sich. Als Nachteile sind die Mehrkosten und Transportemissionen durch die Rückführung der leeren Boxen zu nennen, für die Lösungen zu finden sind (z. B. Vermeiden von Leerfahrten durch Mehrfachnutzung, Einrichtung lokaler Sammelstellen/Depots, Einsatz ökologischer Transportmittel wie Elektrofahrzeuge).

Die Effektivität der jeweiligen Lagerungssysteme hängt von den spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten jedes einzelnen Betriebs ab. Für größere Betriebe, in denen viel Alttextilien anfallen, kann sich die Anschaffung einer eigenen Ballenpresse lohnen. Die klaren Vorteile von Ballenpressen sind die signifikante Reduzierung des Transportvolumens sowie von Verpackungsmaterialien und damit die ökologischen Vorteile mit weniger Emissionen. Kleinere Betriebe sollten je nach Volumen der zu recycelnden Materialien entscheiden, welche Logistikhaltung für sie die effizienteste ist, die sowohl ihren räumlichen Beschränkungen als auch den ökologischen und ökonomischen Anforderungen gerecht wird.

Die Ergebnisse der ökologischen Bilanzierung verschiedener ausgewählter Transportlogistik-Optionen sind in Kap. 4.6 beschrieben.

#### **4.3.4 Bestimmung der spektralen Signatur von Standard-Textil-Targets auf Basis von spektroskopischen und hyperspektralen Messungen (AP 3.5)**

Im ersten Teil des Arbeitspakets erfolgte die Untersuchung sowohl der Targetmaterialien der Firma Dibella als auch der Referenzmaterialien mittels NIR-Spektroskopie zunächst offline mit Desktop-Spektrometern.

Um den Einfluss der optisch streuenden Anteile in den Textilien bewerten zu können, wurden zwei Messgeometrien getestet: Die diffuse Reflexion und die kollimierte Transmission.

In der textilen Analytik kommt typischerweise die *diffuse Reflexionsspektroskopie* zum Einsatz. Hierbei wird der Lichtstrahl auf die Probe gerichtet und aufgrund von Unregelmäßigkeiten oder Rauheiten auf der Oberfläche der Fasern oder des Gewebes wird das Licht diffus, d. h. in alle Richtungen, reflektiert. Verwendet wird dabei der Ulbrichtkugel-Aufbau des Zweistrahl-Spektrophotometer Perkin Elmer Lambda 1050 (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6). Die innere Beschichtung der Kugel sowie die Referenzplatten bestehen aus Spectralon®. Zwei Detektoren – ein Photomultiplier (PMT) und ein InGaAs Detektor – ermöglichen die simultane Aufnahme der Spektren jeweils in dem Bereich UV-Vis (200-860 nm) und NIR (860-2500 nm).

Bei der diffusen Reflexionsmessung befindet sich die Probe am Reflexionsport der Ulbrichtkugel (rechts in Abbildung 6); die Probe wird von einer Lichtquelle mit spektral aufgelöstem Licht durchstrahlt und das reflektierte Licht wird in der Ulbrichtkugel gesammelt und von in der Ulbrichtkugel befindlichen Detektoren erfasst.



Abbildung 5: Zweistrahl-Spektrophotometer der Firma Perkin Elmer Lambda 1050 mit Ulbrichtkugel (Quelle HSRT).

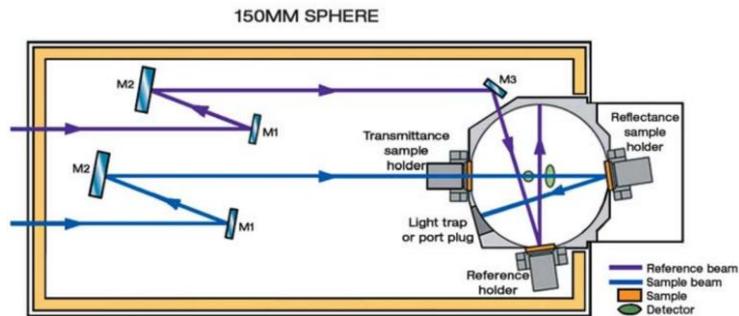


Abbildung 6: Bei der diffusen Reflexionsmessung wird die Probe von einer Lichtquelle mit spektral aufgelöster Strahlung am Reflectance-Port durchstrahlt. Das von der Probe reflektierte Licht wird in der Ulbrichtkugel gesammelt und von Detektoren im Inneren der Kugel gemessen (Quelle: HSRT).

Bei der Messung der kollimierten Transmission wurde das FT-NIR-Spektrometer Perkin Elmer Frontier angewendet (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: FT-NIR-Spektrophotometer der Firma Perkin Elmer Frontier mit Zubehör für die kollimierte Transmission (Quelle: HSRT).

Die kollimierte Transmission bezieht sich auf die Messung der Transmission von Licht durch eine Probe unter Verwendung eines kollimierten Lichtstrahls. Hierbei wird das Licht so ausgerichtet, dass die Lichtstrahlen parallel zueinander verlaufen, wenn sie die Probe durchdringen. Die Messanordnung ist in Abbildung 8 dargestellt.

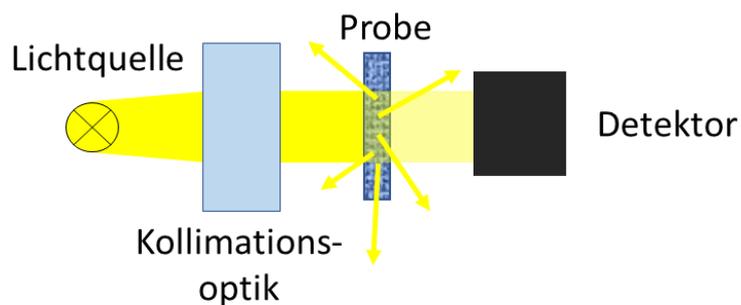


Abbildung 8: Messanordnung der kollimierten Transmission.

In nachfolgender Tabelle 4 sind die Spektrometer und die für die jeweilige Messung verwendeten Parameter aufgelistet.

Tabelle 4: Übersicht über die verwendeten Desktopspektrometer und die verwendeten Einstellungen. Mit  $\lambda$  = Wellenlänge,  $res$  = Auflösung,  $D$  = Spaltbreite,  $t_{int}$  = Integrationszeit,  $\nu$  = Wellenzahl und  $n$  = Anzahl an Spektren.

**Spektrometer: Perkin Elmer® Lambda 1050**  
**Messanordnung: diffuse Reflexion**

$\lambda$ / nm	$D$ / nm	$res$ / nm	$t_{int}$ / s
900–2500	2.0	2	0.2

**Spektrometer: Perkin Elmer® Frontier FT-NIR mit Transmission Accessory**  
**Messanordnung: kollimierte Transmission**

$\lambda$ / nm	$res$ / $cm^{-1}$	$n$
900–2500	4	16

Alle Proben wurden auf beiden Seiten, sowohl Vorderseite als auch Rückseite, vermessen. Diese doppelte Messung dient dazu sicherzustellen, dass potenzielle Unterschiede in der Homogenität, Oberflächenbeschaffenheit, Oberflächenbehandlungen, Ausrichtung und Faserverlauf auf beiden Seiten erfasst werden. Falls es Unterschiede zwischen Vorder- und Rückseite gibt, können diese berücksichtigt werden.

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 9 und Abbildung 10) sind die spektralen Signaturen von CO und PES und deren jeweilige Bandenzuordnung dargestellt.

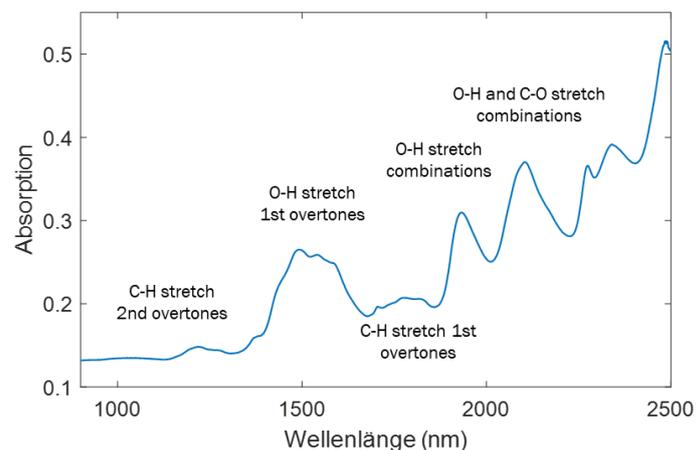


Abbildung 9: NIR-Spektrum von CO 100% Textilgewebe und Bandenzuordnung.

Charakteristische Absorptionsbanden sind für beide Materialien zu erkennen: CO zeigt charakteristische Peaks aufgrund der funktionellen Gruppen der Cellulose- und Hemicellulosestrukturen, während PES Absorptionen der C-H-Bindungen und Estergruppen aufweist.

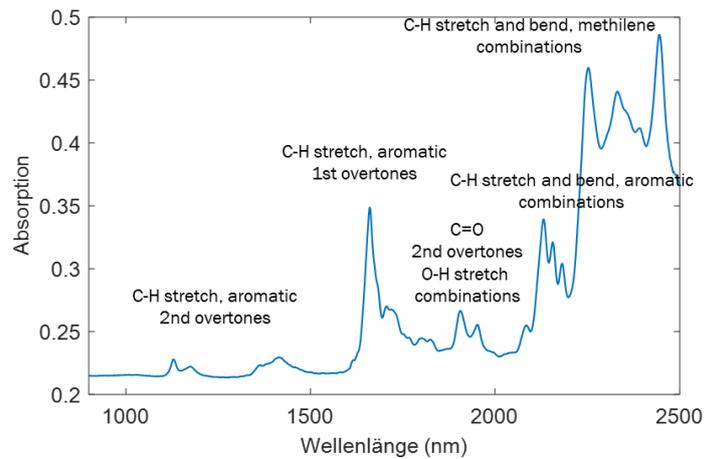


Abbildung 10: NIR-Spektrum von 100% PES Textilgewebe und Bandenzuordnung.

In folgender Abbildung 11 ist das NIR-Spektrum von einem Mischgewebe CO/PES = 50/50 dargestellt.

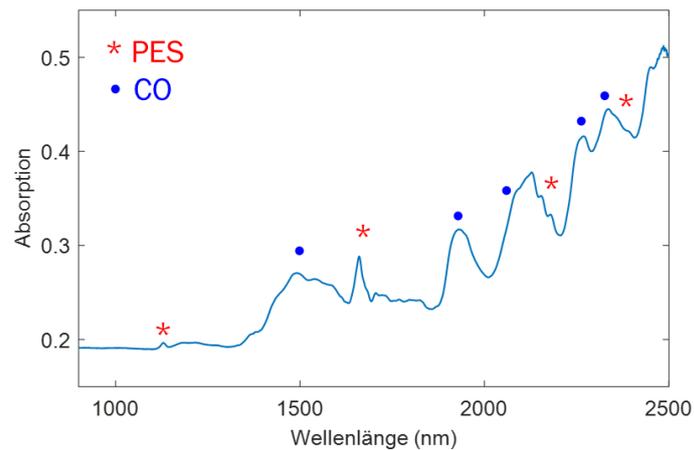


Abbildung 11: NIR-Spektrum von Mischgewebe 50% CO/50%PES: in Blau (•) sind die Absorptionsbanden von CO bezeichnet, in Rot (\*) die Banden von PES.

Das Nahinfrarotspektrum zeigt typische Merkmale beider Materialien und ist im Wesentlichen eine lineare Kombination der Spektren der reinen Fasern CO und PES. Die genaue Zusammensetzung des Gemischs kann dann durch fortgeschrittene Analysemethoden wie multivariate Datenanalyse quantifiziert werden.

Die Spektren von CO und Cellulose regenerat (Tencel™) sind in Abbildung 12 dargestellt.

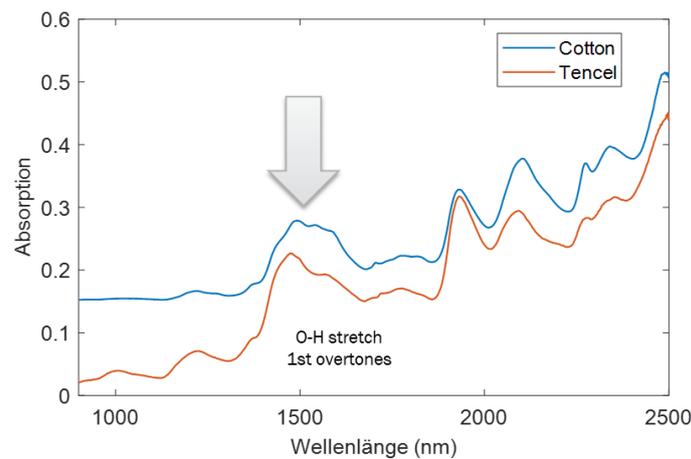


Abbildung 12: NIR-Spektrum von 100% CO (blau, Gewebe) und 100% Celluloseregenerat (rot, Fasern).

Die Spektren zeigen unterschiedliche Absorptionspeaks von CO und Celluloseregenerat bei 1400–1600 nm bzw. 2100 nm aufgrund von O-H- bzw. C-H-Vibrationen in den Celluloseketten.

Diese Unterschiede in den Absorptionspeaks und -banden ermöglichen die Unterscheidung zwischen CO und regenerierter Cellulose (Viskose, Lyocell, Tencel<sup>TM</sup>, Refibra<sup>TM</sup>) mithilfe von NIR-Spektroskopie.

Die Messungen in diffuser Reflexion für die Vorder- und Rückseite zeigen im Allgemeinen keine signifikanten Unterschiede, mit Ausnahme der Proben B2, B9, B10, H1 und H2. Interessanterweise verschwinden diese Unterschiede vollständig, wenn die Messungen in kollimierter Transmission durchgeführt werden, wie Abbildung 13 beispielhaft veranschaulicht. Dies lässt sich auf die spezifische Konstruktion der oben genannten Gewebeproben zurückführen, bei denen die unterschiedlichen Zusammensetzungen der Garne in Kette und Schuss eine Rolle spielen. In Abbildung 14 ist beispielhaft an Probe B2 zu erkennen, dass bei unterschiedlicher Zusammensetzung der Fäden in Kett- und Schussrichtung (Polycotton CO/PES = 50:50 bzw. 100% CO) des Gewebes je nach Detektion von Ober- oder Unterseite des Gewebes unterschiedliche Zusammensetzungen erfasst werden.

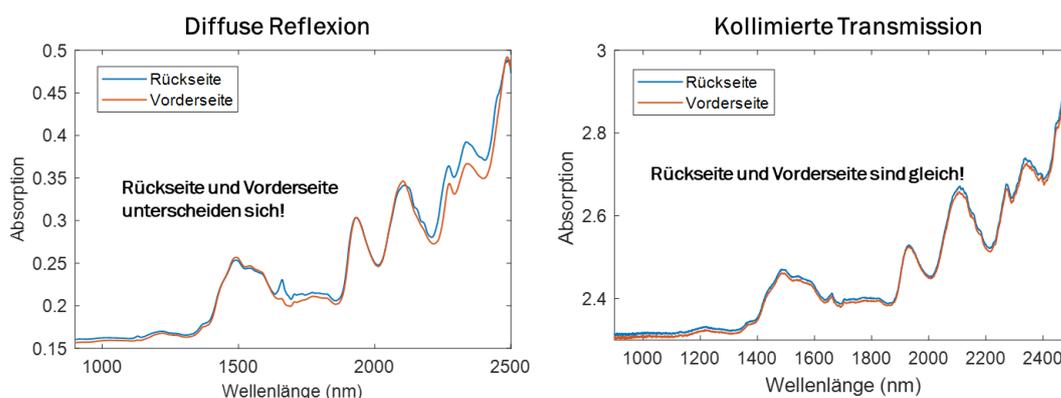


Abbildung 13: NIR-Spektrum der Probe B2 in diffuser Reflexion (links) und kollimierter Transmission (rechts).

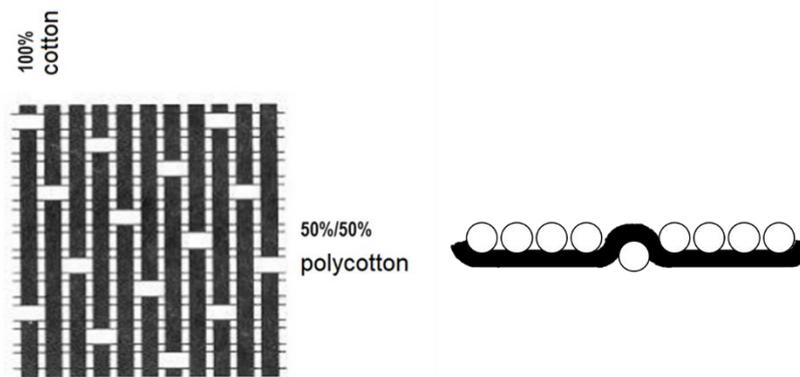


Abbildung 14: Frontal- (links) und Seitenansicht (rechts) der 4/1-Satinbindung für die Musterprobe B2.

Angesichts der praktischen Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Messaufbaus in kollimierter Transmission, insbesondere bei dicken Textilien, werden weitere Untersuchungen in dieser Richtung nicht weiterverfolgt, obwohl sie eine höhere Genauigkeit bei den Vorhersagen der Materialzusammensetzung ermöglichen würden. Die erreichte Genauigkeit der Messungen in diffuser Reflexion können jedoch als ausreichend betrachtet werden.

Im zweiten Abschnitt des Arbeitspakets wurden die Mustermaterialien sowie die Referenztextilien mit der hyperspektralen Kamera umfassend vermessen.

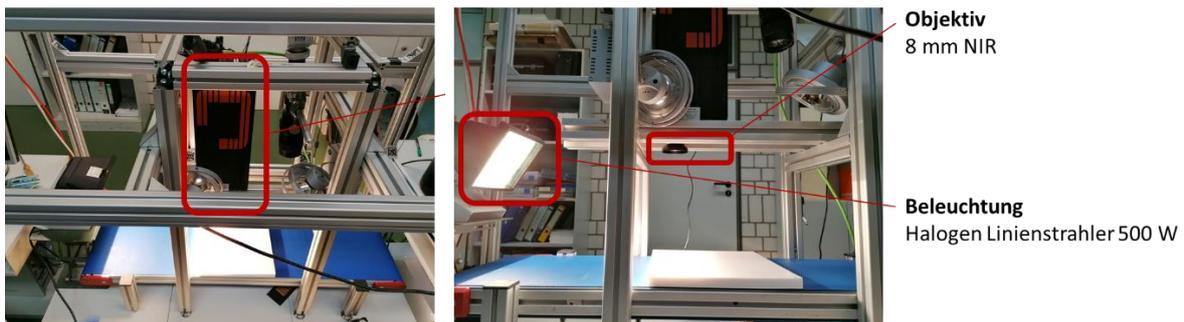


Abbildung 15: Förderband der Hochschule Reutlingen mit integrierter Hyperspektralkamera und Beleuchtungskonzept (Quelle: HSRT).

Das bildgebende hyperspektrale System besteht aus dem Pushbroom Redeye 2 (Inno-spec GmbH), dem Förderband und der Lichtquelle. Die Messgeometrie ist durch den Einsatz eines 8 mm NIR-Weitwinkelobjektivs optimiert, so dass auch große Ausschnitte von großen 3D-Objekten bei geringem Abstand und gleichzeitig hoher Schärfentiefe abgebildet werden können. Als Lichtquelle wird ein 500 W Halogen-Linienstrahler mit parabolischem Retroreflektor verwendet, der in einem Winkel von  $45^\circ$  zum Detektor ausgerichtet ist (siehe Abbildung 15). Die verwendete Kamera ist mit einer GigE-Vision-Schnittstelle ausgestattet.

Hinsichtlich des Kamerakonzeptes und der Anforderungen an die spektrale Auflösung sind die Spezifikationen in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Spezifikationen des hyperspektralen Imaging-Systems.

Messprinzip	Line-Scanning-System (Pushbroom)
Detektor	InGaAs, 320 x 256 Pixel (30x30 µm Pixelgröße)
Spektralbereich	950 nm – 1700 nm
Spektrale Auflösung	10 nm (mit 80 µm Schlitzbreite)
Frame Rate	330 fps (full frame)

Die Ortsauflösung der Kamera ist bei dieser Messgeometrie kleiner als 1 mm. Das Förderband erreicht eine maximale Geschwindigkeit von 9,5 cm/s. Um eine Verzerrung der Aufnahmen zu vermeiden, muss die Kamera von 330 fps auf 150 fps bei einer Integrationszeit von 2,8 ms reduziert werden.

In Abbildung 16 ist die Sensoraufnahme als Falschfarbendarstellung in NIR des Trainingsdatensatzes aller Textilproben abgebildet.

RGB Image (X Training)

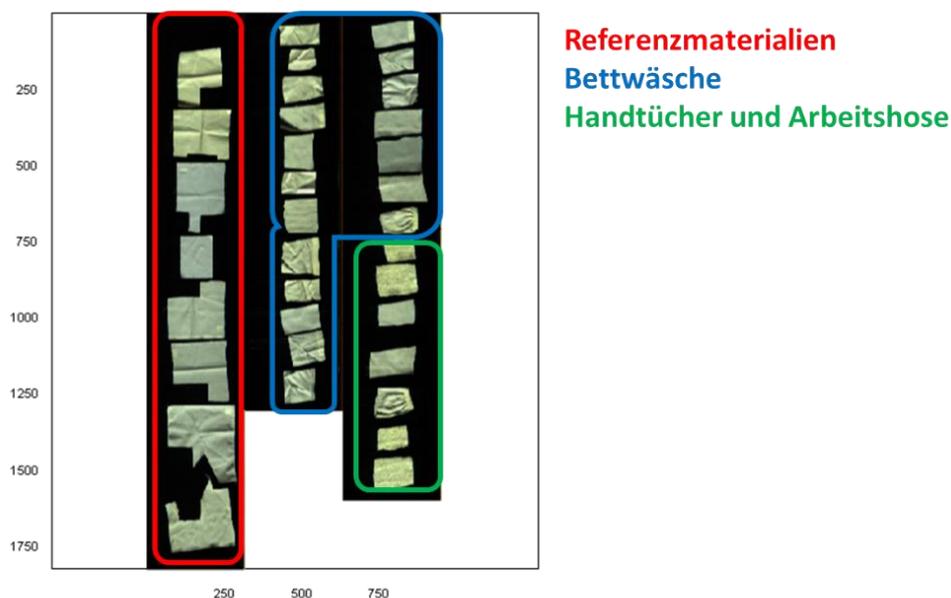


Abbildung 16: Sensoraufnahme als Falschfarbendarstellung in NIR des Trainingsdatensatzes aller Textilproben. Rot: Referenzmaterialien, Blau: Bettwäsche; Grün: Handtücher und Arbeitshose.

#### 4.3.5 Entwicklung von Modellen für die Klassifizierung und Quantifizierung der Textilien in Echtzeit (KI) (AP 3.6)

In diesem Arbeitspaket erfolgt die Bild- und Spektralanalyse sowie die Klassifizierung der in Tabelle 1 gezeigten und untersuchten Textilien. Die Messdaten werden mithilfe multivariater Datenanalyse (MVA) ausgewertet. Dabei kommen verschiedene mathematische Datenvorverarbeitungen zum Einsatz, um die Informationsstreuung von der Informationsabsorption

möglichst zu 100% zu trennen. Hierzu zählen Methoden wie die Extended Multiplicative Scattering Correction (EMSC), die Standard Normal Variate (SNV), die erste und zweite Ableitung oder deren Kombinationen.

Zunächst werden die gemessenen Daten einer explorativen Analyse mittels Hauptkomponentenanalyse (PCA) unterzogen. Die Hauptkomponentenanalyse ist eine statistische Methode, die in der Datenanalyse verwendet wird, um die Varianz in einem Datensatz zu reduzieren und die wichtigsten Merkmale zu identifizieren. Sie transformiert die ursprünglichen Variablen in einen neuen Satz unkorrelierter Variablen, die als Hauptkomponenten bezeichnet werden.

Die Hauptkomponentenanalyse wird häufig verwendet, um die Dimensionalität von Datensätzen zu reduzieren. Durch die Reduktion der Dimensionalität können komplexe Datensätze vereinfacht und strukturiert werden, ohne dass wichtige Informationen verloren gehen.

Die EMSC wird als spektrale Vorverarbeitung für die Datenauswertung verwendet, wodurch Informationen über die Materialzusammensetzung dominieren und Streuungsinformationen weitgehend unterdrückt werden.

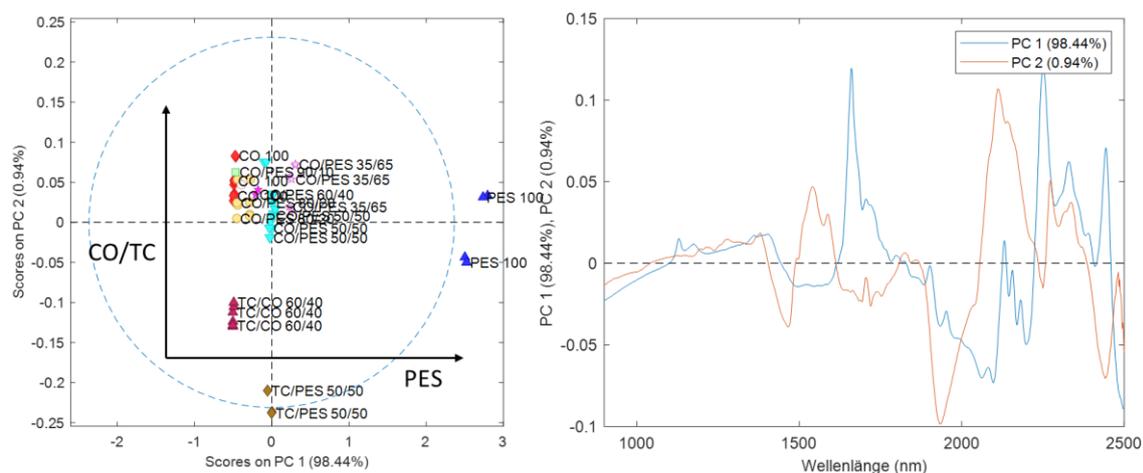


Abbildung 17: Scoreplot (links) und Loadingsplot (rechts) der ersten 2 Hauptkomponenten.

Die Darstellung der Scores und Loadings in Abbildung 17 gibt Aufschluss über die ersten beiden Hauptkomponenten. Die ersten zwei Komponenten erklären über 99% der Gesamtvarianz. Die erste Hauptkomponente beschreibt die Unterschiede zwischen Textilien aus PES und Textilien aus Cellulose (CO/Tencel™). Die zweite Hauptkomponente zeigt Informationen über die Variationen in den cellulosehaltigen Textilien. Die Trennung basiert auf der Esterbande von PES bei 1660 nm für die erste Hauptkomponente und auf der Cellulosebande bei 1930 nm für die 2. Hauptkomponente.

Die gemessenen NIR-Daten und die entsprechenden Konzentrationen werden zunächst in eine Regressionsanalyse eingebracht, um mathematische Modelle zur Vorhersage der Materialzusammensetzung zu entwickeln. Für die Quantifizierung der Materialzusammensetzung wird eine multivariate Partial Least Squares (PLS) Regression eingesetzt. Dabei werden

latente Variablen, sog. Partial Least Squares-Komponenten, gebildet, die maximale kovariante Information zwischen Spektralmerkmalen und Baumwollgehalt enthalten.

Abbildung 18, Abbildung 19 und Abbildung 20 präsentieren die Ergebnisse der PLS-Regression für CO, PES und Celluloseregenerat. Für die Kreuzvalidierung wurde das Leave-One-Out-Verfahren verwendet. Die Leistung des PLS-Modells wurde anhand der mittleren quadratischen Fehler RMSEC, RMSECV und des Korrelationskoeffizienten  $R^2$  (Werte zwischen 0 und 1) bewertet. Der Fehler RMSECV liegt bei 7,5% für CO, 5,3% für PES und 4,6% für Tencel™. Die Fehler liegen für alle drei Materialien innerhalb der Toleranzgrenzen unter 10%. Ein Bias als systematischer Fehler ist aus der Statistik nicht erkennbar. Die Korrelationskoeffizienten zwischen den vorhergesagten Werten und den tatsächlichen Messwerten sind hoch und statistisch signifikant.

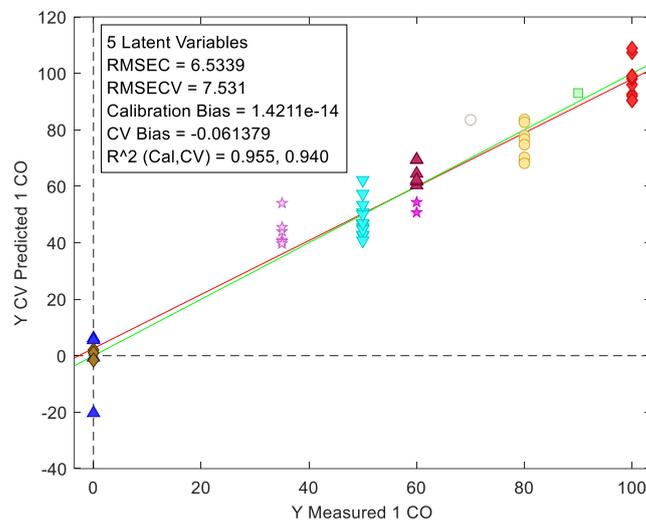


Abbildung 18: Scatterplot des PLS-Modells zwischen Referenz- und Messwerten für Baumwolle.

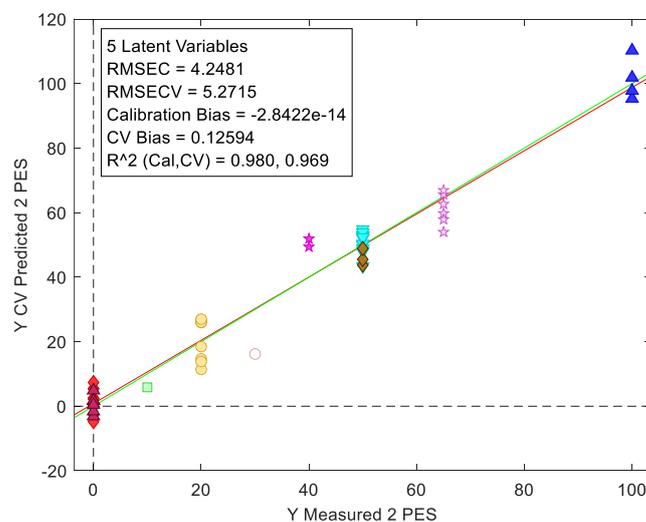


Abbildung 19: Scatterplot des PLS-Modells zwischen Referenz- und Messwerten für Polyester.

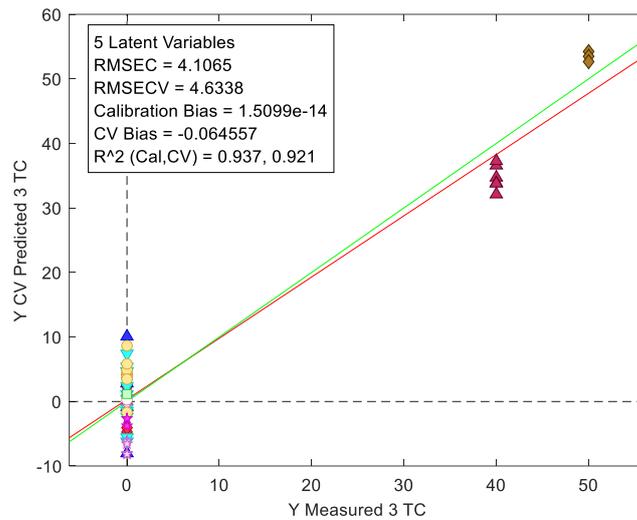


Abbildung 20: Scatterplot des PLS-Modells zwischen Referenz- und Messwerten für TenceI™.

Mit den Daten der hyperspektralen Messungen wurde erstmal eine explorative Analyse mittels Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Für die Datenauswertung wurde die 1. Ableitung (Savitzky-Golay mit 11 Punkten und Polynom 2. Grades) als spektrale Vorverarbeitung verwendet. Der optimale Wellenlängenbereich liegt zwischen 920 nm und 1670 nm. Der Hintergrund wurde entfernt.

Abbildung 21 zeigt, wie die Trennung zwischen den Materialien bereits mit der ersten Hauptkomponente erfolgt, die 79% der Gesamtvarianz erklärt. Die Scores der verschiedenen Materialien sind deutlich unterschieden und jede Probe mit einer entsprechenden Zusammensetzung erscheint auf der ersten Hauptkomponente als eine eindeutige Gruppe. Die maximale Varianz auf PC1 ist zwischen CO und PES. Die Trennung basiert auf der Ester-Bande von PES bei 1660 nm.

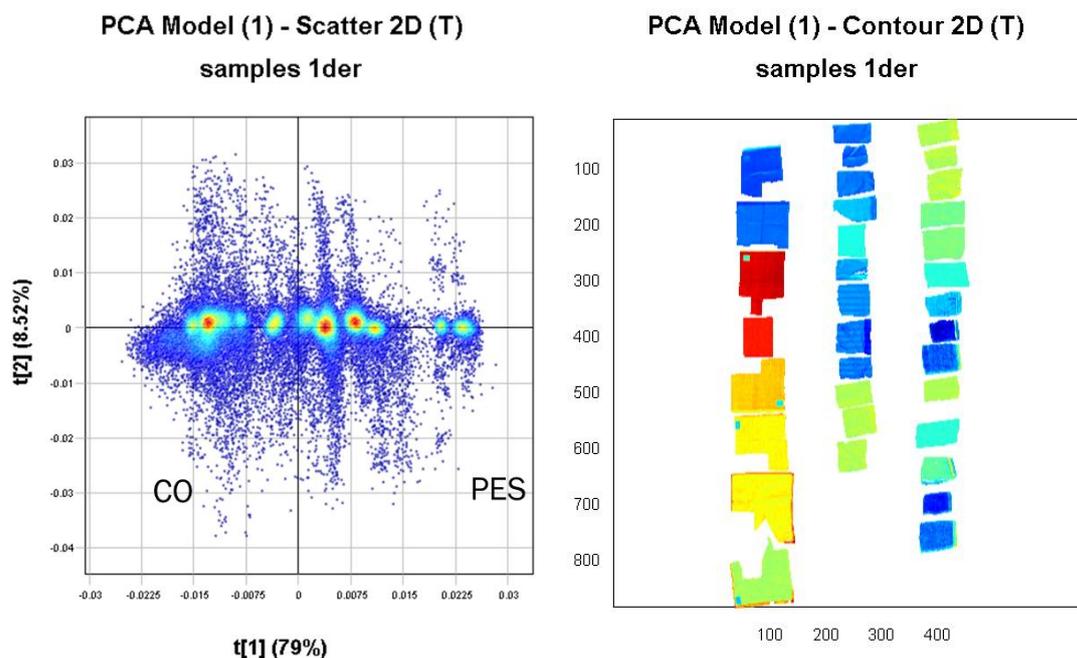


Abbildung 21: Score-Scatterplot (links) und Image-Scoreplot (rechts) der ersten Hauptkomponente.



**PLS Model - Observed vs Calculated**

**DataSet PLS**

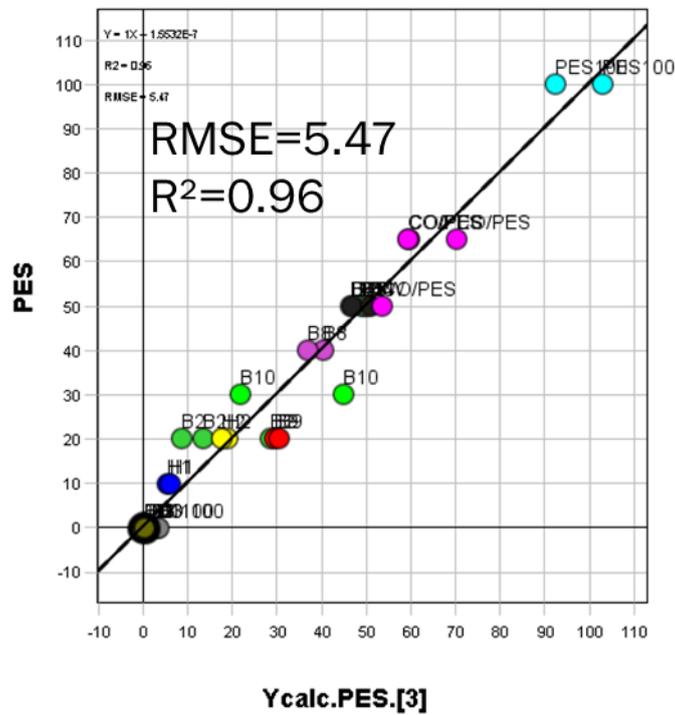


Abbildung 23: Scatterplot des PLS-Modells zwischen Referenz- und Messwerten für Polyester.

**PLS Model - Observed vs Calculated**

**DataSet PLS**

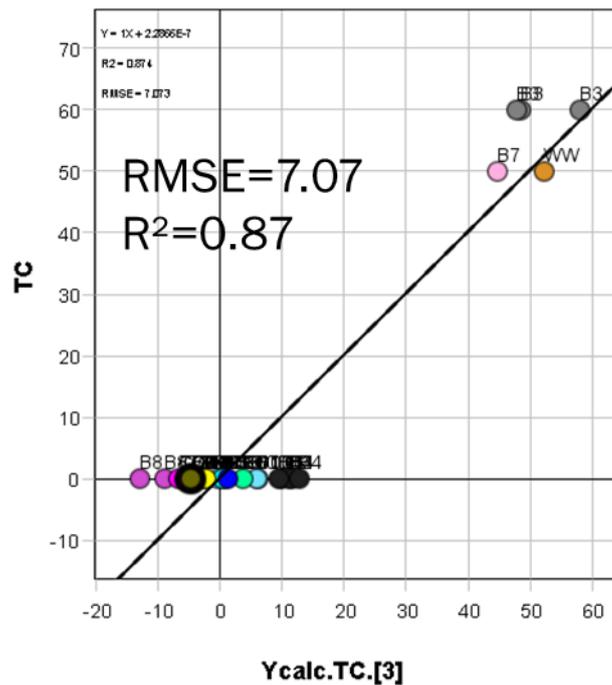


Abbildung 24: Scatterplot des PLS-Modells zwischen Referenz- und Messwerten für Tencel™.

Im nächsten Schritt wurde die klassische multivariate Datenanalyse durch Algorithmen des überwachten maschinellen Lernens erweitert, um die Vorhersagegenauigkeit der Klassifikationsleistung zu verbessern.

Zur Ausweitung der Analyse wurden verschiedene Algorithmen des maschinellen Lernens implementiert sowohl für die Klassifizierung der Textilien als auch für die numerische Quantifizierung der Zusammensetzungen. Dazu gehörten überwachte Lernalgorithmen wie Entscheidungsbaum, Support Vector Machine (SVM), Decision Tree, Maximum Entropy, Random Forest Linear and Poisson Regression usw.

Die Implementierung der Modelle erfolgte in mehreren Schritten. Zunächst wurden die Daten mittels PCA von Hintergrundpixeln bereinigt. Um die Robustheit und Generalisierungsfähigkeit der Modelle zu erhöhen und eine zu starke Anpassung der Modelle an die Trainingsdaten zu vermeiden, wurde eine Datenaugmentierung mit repräsentativen Spektren mit Gauss-Verteilung durchgeführt. Zur Vermeidung von Overfitting wurde eine Kreuzvalidierung durchgeführt. Die Ergebnisse der klassischen multivariaten Analyse und der erweiterten Modelle wurden dann verglichen, um die Leistungsverbesserungen zu bewerten.

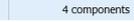
Tabelle 6 zeigt die Optimierungsmetriken für verschiedene Klassifikationsalgorithmen des maschinellen Lernens: Der Maximum-Entropie-Algorithmus zeigt die besten Ergebnisse mit sehr hohen Genauigkeitswerten und niedrigen Log-Loss-Werten, was auf eine sehr gute Klassifikationsleistung hinweist.

*Tabelle 6: Optimierungsmetriken für die verwendete Klassifizierungsalgorithmen des maschinellen Lernens.*

Model statistics								
Algorithm Name	Macro Accuracy	Log Loss	Log Loss Reduction	Micro Accuracy	Top KAccuracy	Macro Accuracy Test	Cross Validation Macro ...	Runtime in Seconds
Maximum Entropy (SDCA)	0.95053	0.10745	0.95022	0.96105	0	0.95663	0.94736	59.14
Neural Network (AP)	0.89533	0.33145	0.84662	0.91879	0	N/A	N/A	26.24
Decision Tree (LGBM)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	15.45 (Did not finish)

Tabelle 7 vergleicht die Modelle des maschinellen Lernens und der partiellen kleinsten Quadrate-Diskriminanzanalyse (PLS-DA). Die hohen Werte der kumulativen Varianzen für die Kalibrierung R2Y und für die Kreuzvalidierung Q2Y zeigen, dass die Algorithmen des maschinellen Lernens die Vorhersagegenauigkeit und die Klassifikationsleistung im Vergleich zu den klassischen Verfahren signifikant verbessern konnten.

*Tabelle 7: Vergleich der Klassifizierungsmodelle des maschinellen Lernens und der PLS-DA.*

Compare models						
Name /	Variable	Method	Rating	Q2Y	R2Y	Other
Classification - Machine Learning	Material	Machine Learning	 97	 0.94736	 0.95053	SdcaMaximumEntropy
Classification - PLS-DA	Material	PLS-DA	 29	 0.16285	 0.35427	4 components

Die Ergebnisse werden nun in Form einer Konfusionsmatrix dargestellt, welche die tatsächlichen Klassen mit den vom Modell vorhergesagten Klassen vergleicht (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Konfusionmatrix für die Klassifizierung mittels maschinellen Lernens.

Confusion Matrix (For classification models only)

Actual classes	Total	CO100	CO/PES 80/20	TC/CO 60/40	CO/PES 50/50	TC/PES 50/50	CO/PES 60/40	CO/PES 70/30	CO/PES 90/10	PES100	CO/PES 35/65	No class
CO100	500 (14.7%)	498 (99.6%)						1 (0.2%)	1 (0.2%)			
CO/PES 80/20	700 (20.6%)		674 (96.3%)					26 (3.71%)				
TC/CO 60/40	300 (8.82%)			300 (100%)								
CO/PES 50/50	600 (17.6%)				600 (100%)							
TC/PES 50/50	200 (5.88%)					200 (100%)						
CO/PES 60/40	200 (5.88%)						200 (100%)					
CO/PES 70/30	200 (5.88%)		73 (36.5%)					127 (63.5%)				
CO/PES 90/10	200 (5.88%)								200 (100%)			
PES100	200 (5.88%)									200 (100%)		
CO/PES 35/65	300 (8.82%)									1 (0.333%)	299 (99.7%)	
# Predicted	3400 (100%)	498 (14.6%)	747 (22%)	300 (8.82%)	600 (17.6%)	200 (5.88%)	200 (5.88%)	154 (4.53%)	201 (5.91%)	201 (5.91%)	299 (8.79%)	0
Correctly	3298 (97%)											
Incorrectly	102 (3%)											
Precision		100%	90.2%	100%	100%	100%	100%	82.5%	99.5%	99.5%	100%	
Recall		99.6%	96.3%	100%	100%	100%	100%	63.5%	100%	100%	99.7%	
F-score		99.8%	93.2%	100%	100%	100%	100%	71.8%	99.8%	99.8%	99.8%	

Die Proben lassen sich mit nahezu 100% Präzision vorhersagen, mit Ausnahme von CO/PES 80/20, CO/PES 70/30 und CO/PES 90/10, wobei die Genauigkeit für die letzten beiden Proben ausreichend ist. Der Grund für das schlechtere Abschneiden liegt in der besonderen Konstruktion dieser Textilien, bei der die Garne in Schuss und Kette unterschiedliche Zusammensetzungen haben, wie bereits oben erläutert.

Es ist bemerkenswert, dass Tencel™ und Lyocell bei den Algorithmen des maschinellen Lernens so gut abgeschnitten haben, vor allem wenn man bedenkt, dass die Ergebnisse der PLS-DA weniger zufriedenstellend waren.

Zusätzlich zu den Klassifikationsmodellen wurden zur genaueren Bestimmung der Menge und Zusammensetzung der verschiedenen Klassen auch Regressionsmodelle mithilfe von maschinellem Lernen trainiert. Bei der Regression zeigte der FastTree-Algorithmus die besten Metriken aller Modelle.

Tabelle 9: Vergleich der Quantifizierungsmodelle des maschinellen Lernens und der PLS-Regression.

Compare models

Name /	Variable	Method	Rating	Q2Y	R2Y	Other
Quantification PLS	CO%, PES%, TC%	PLS	83	0.82741	0.92335	5 components
Quantification CO - ML	CO%	Machine Learning	99	0.99425	0.98903	FastTree
Quantification PES - ML	PES%	Machine Learning	99	0.99757	0.99491	FastTree
Quantification TC - ML	TC%	Machine Learning	98	0.98307	0.9753	FastTree

Tabelle 10: Vergleich der Root-Mean-Square-Error-Fehlerkennzahlen (RMSE) für die Vorhersage des maschinellen Lernens und der PLS-Regression.

	PLS	ML
TC	6.97	3.13
PES	5.64	1.86
CO	7.67	3.13

Auch bei den Regressionsmodellen liefern die Algorithmen des maschinellen Lernens bessere Ergebnisse, wie die Werte von Q2Y und R2Y in der Tabelle 9 und die Fehlerkennzahlen RMSE in Tabelle 10 zeigen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Erweiterung der klassischen multivariaten Datenanalyse durch den Einsatz von maschinellem Lernen die Vorhersageleistung deutlich erhöht hat. Hiermit ist das Proof of Concept für die Klassifizierung und Quantifizierung der betrachteten Textilzusammensetzungen in Echtzeit im Labormaßstab nachweislich erstellt.

#### **4.3.6 Demonstrator-Entwicklung: Testphase Sortierung und Implementierung des NIR-Detektiersystems (AP 3.7)**

Die ersten Schritte zur Implementierung des NIR-Detektionssystems fanden im April 2024 bei der Firma Inwatec ApS in Odense, Dänemark statt. Dabei wurden die NIR-Kamera und die Beleuchtung in das bestehende Sortiersystem integriert und Testläufe durchgeführt. Ziel der Testmessungen war die Optimierung des Messaufbaus und der Messparameter. Damit sollte die Skalierbarkeit des Systems bestätigt werden (siehe Abbildung 25).



*Abbildung 25: Implementierung des NIR-Labormesssystems in die Sortiermaschine. Links: Gesamtaufbau mit Kamera, Beleuchtung und Steuerrechner. Mitte: Details der Beleuchtung. Rechts: Übersicht des Sortiersystems (Quelle: HSRT).*

Die Kamera wurde so nah wie möglich am Förderband positioniert, da das Weitwinkelobjektiv dies erfordert. Die Integrationszeit konnte auf ein Minimum von 2,4 ms eingestellt werden, so dass die Messungen mit der maximalen Bildrate von 344 Hz durchgeführt werden konnten. Es war möglich, ohne Verstärkung, ohne Binning der Pixel und mit der gesamten ROI (Region of Interest) zu messen.

Die Beleuchtung wurde so ausgerichtet, dass sie ihre maximale Intensität etwa 15-20 cm über dem Förderband erreichte, und die Kamera wurde ebenfalls auf diese Höhe fokussiert. Die Temperaturen im Brennpunkt der Lampe wurden ebenso gemessen; die Werte lagen über 65°C, was für Textilien kritisch sein kann.

Mit diesem Messaufbau und den Parametereinstellungen war es möglich, die gesamte Breite des Förderbandes zu beleuchten und zu erfassen. Die Förderbandgeschwindigkeit betrug 1,5 m/s.

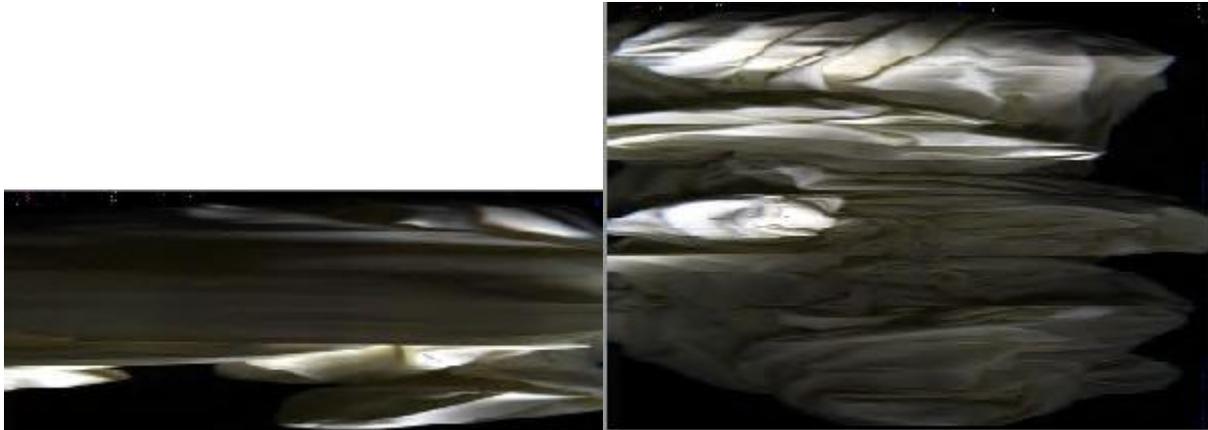


Abbildung 26: Testmessungen von Textilien in der Sortieranlage von Inwatec ApS. Links: Kissenbezug. Rechts: Bettwäsche (Quelle: HSRT).

Bei der hohen Geschwindigkeit des Förderbandes ist eine Verzerrung der Bilder zu erwarten, da diese verkürzt werden. Die kurze Integrationszeit der Kamera ermöglichte jedoch eine Aufnahme mit genügend Pixeln, um klare und detaillierte Bilder zu erhalten, wie in Abbildung 26 gezeigt. Die Anzahl der aufgenommenen Pixel war im Durchschnitt 15.000 für die kleinen Textilien wie Kissenbezüge und 50.000 für die großen Textilien wie Bettwäsche.

Die Echtzeit-Segmentierung der erfassten Textildaten funktioniert einwandfrei. Abbildung 27 zeigt eine Beispielmessung, welche die Qualität und Genauigkeit der Erfassung und Segmentierung verdeutlicht.

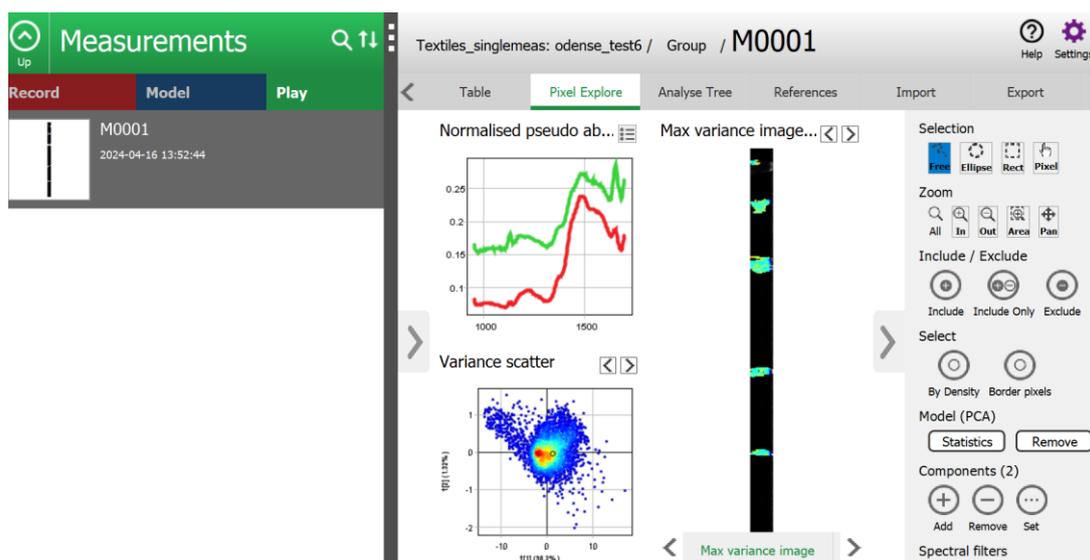


Abbildung 27: Beispielmessungen von Textilien in der Sortieranlage von Inwatec ApS.

Die erfolgreiche Implementierung von Kamera und Beleuchtung am Demonstrator hat die Skalierbarkeit des Systems bestätigt und damit die Fähigkeit des Systems, Textilien in Echtzeit zu erfassen und zu analysieren.

#### 4.3.7 Validierung und Optimierung des Messsystems zur Klassifizierung und Quantifizierung der Textilien, Erarbeitung von Anforderungen und Restriktionen für eine industrielle Umsetzung (AP 3.8)

In der zweiten Phase, die im August 2024 stattfand, wurden Messungen an Textilien mit unterschiedlichen Fasermischungen durchgeführt, deren Zusammensetzung in Tabelle 11 dargestellt ist.

Tabelle 11: Zusammensetzung der gemessenen Textilien im August 2024.

Bezeichnung	Materialzusammensetzung		Farbe
COPE5050	CO/PES = 50/50		weiß
COLY4060	CO/Lyocell = 40/60		weiß
PES100grau	PES = 100%		grau
CO100	CO =100%		weiß
LYPES5050	Lyocell/PES = 50/50		weiß
COPE8020_a	CO/PES = 80/20 Satin	Außenseite	weiß
COPE8020_i	CO/PES = 80/20 Satin	Innenseite	weiß
COPE8020	CO/PES = 80/20 Leinwand		weiß
PES100weiß	PES = 100%		weiß

Zur Gewährleistung der Repräsentativität und Zuverlässigkeit der Ergebnisse wurden für jede Probe fünf Wiederholungen durchgeführt, um die Algorithmen zu trainieren (Kalibrierung oder Trainings-Set). Zusätzlich wurden die Textilien in einem separaten Durchgang erneut gemessen, um die Vorhersagemodelle zu validieren (Validierung oder Test-Set). Diese Validierungsläufe bestätigten die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der entwickelten Modelle, indem die Vorhersagen mit den tatsächlichen Messergebnissen verglichen wurden.

Mit dem Trainings-Set wurde eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) durchgeführt, um den Hintergrund zu entfernen und die Proben zu segmentieren. Die Ergebnisse der PCA zusammen mit den Mittelwertspektren sind in Abbildung 28 dargestellt und zeigen die verschiedenen Textilgruppen basierend auf ihren Zusammensetzungen: Die erste Hauptkomponente (PC1) beschreibt die spektralen Unterschiede zwischen Cellulose (Baumwolle und Cellulose-regenerate) und Polyester, während die zweite Hauptkomponente (PC2) die unterschiedlichen Zusammensetzungen der Mischgewebe aufzeigt.

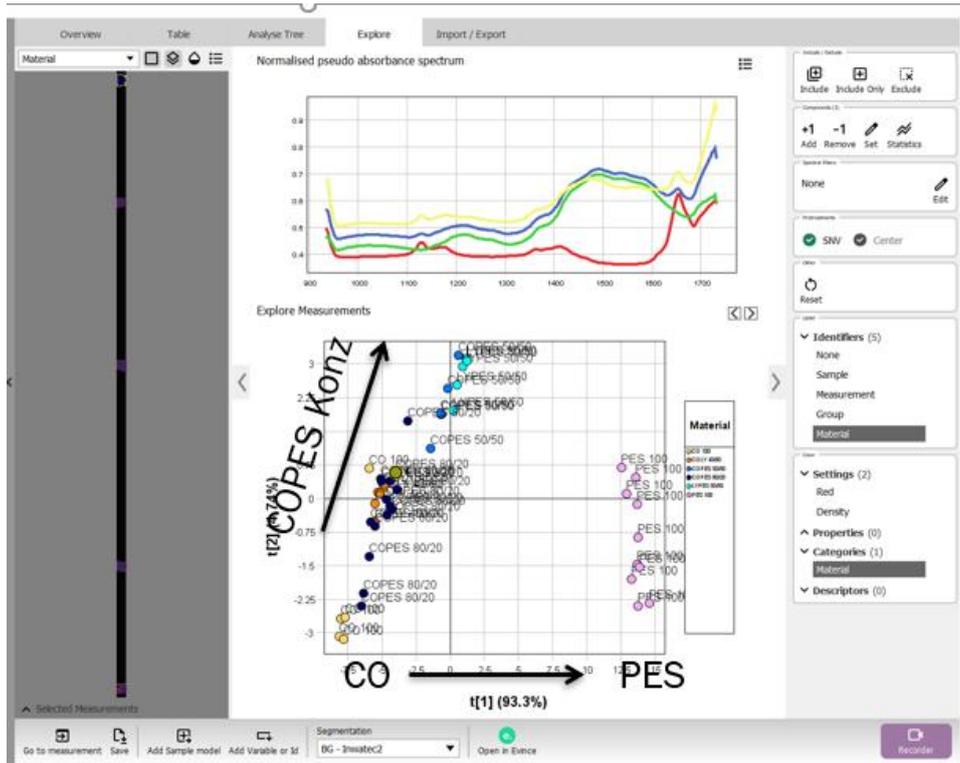


Abbildung 28: Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse (PCA).

Für die Erstellung von prädiktiven Modellen wurde sich in diesem Fall auf Klassifikationsalgorithmen beschränkt. Dies war notwendig, da die Anzahl der Proben mit unterschiedlicher Zusammensetzung nicht ausreichte, um zuverlässige Regressionsmodelle zu entwickeln.

In Abbildung 29 sind die gemessenen Textilien nach Segmentierung und die entsprechenden Kategorien für die Klassifizierung gezeigt.

Sample	Group	Image	Material
COPEs8020VS (1)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020VS (2)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020VS (3)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020VS (4)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020VS (5)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020RS (1)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020RS (2)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020RS (3)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020RS (4)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020RS (5)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020Lenwand (1)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020Lenwand (2)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020Lenwand (3)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020Lenwand (4)	Group	[Image]	COPEs 80/20
COPEs8020Lenwand (5)	Group	[Image]	COPEs 80/20
LYPEs5050 (1)	Group	[Image]	LYPEs 50/50
LYPEs5050 (2)	Group	[Image]	LYPEs 50/50
LYPEs5050 (3)	Group	[Image]	LYPEs 50/50
LYPEs5050 (4)	Group	[Image]	LYPEs 50/50
LYPEs5050 (5)	Group	[Image]	LYPEs 50/50
CO100 (1)	Group	[Image]	CO 100
CO100 (2)	Group	[Image]	CO 100
CO100 (3)	Group	[Image]	CO 100
CO100 (4)	Group	[Image]	CO 100
CO100 (5)	Group	[Image]	CO 100
PES100grau (1)	Group	[Image]	PES 100
PES100grau (2)	Group	[Image]	PES 100
PES100grau (3)	Group	[Image]	PES 100

Abbildung 29: Überblick der gemessenen Textilien nach Segmentierung mit der entsprechenden Klassenzuordnung.

Zur Minimierung der Auswirkungen von Schatten, spektralen Reflexionen und Unterschieden in der Fokussierung wurde zur Datenaugmentierung die Grid- und Inset-Segmentierung anstelle der Methode der repräsentativen Spektren verwendet.

Auch in diesem Fall zeigte der Maximum-Entropie-Algorithmus die höchste Genauigkeit, wie in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Optimierungsmetriken für die verwendeten Klassifizierungsalgorithmen des maschinellen Lernens.

Model statistics

Algorithm Name	Macro Accuracy	Log Loss	Log Loss Reduction	Micro Accuracy	Top KAccuracy	Macro Accuracy Test	Cross Validation Macro Accuracy	Runtime...
Maximum Entropy (SDCA)	0.99697	0.02841	0.98323	0.99422	0	1	0.99179	18.06
Decision Tree (LGBM)	0.98536	0.04583	0.97282	0.99048	0	N/A	0.97963	5.93
Neural Network (AP)	0.99697	0.15781	0.90683	0.99422	0	N/A	0.96902	6.59

Tabelle 13: Konfusionsmatrix für die Klassifizierung mittels maschinellen Lernens.

Confusion Matrix (For classification models only)

Actual classes	Total	COPE5050	COLY4060	PES100	CO100	LYPES5050	COPE8020	No class
COPE5050	50 (11.1%)	50 (100%)						
COLY4060	49 (10.9%)		49 (100%)					
PES100	95 (21.2%)			95 (100%)				
CO100	50 (11.1%)				50 (100%)			
LYPES5050	55 (12.2%)					55 (100%)		
COPE8020	150 (33.4%)				1 (0.667%)		149 (99.3%)	
# Predicted	449 (100%)	50 (11.1%)	49 (10.9%)	95 (21.2%)	51 (11.4%)	55 (12.2%)	149 (33.2%)	0
Correctly	448 (99.8%)							
Incorrectly	1 (0.223%)							
Precision		100%	100%	100%	98%	100%	100%	
Recall		100%	100%	100%	100%	100%	99.3%	
F-score		100%	100%	100%	99%	100%	99.7%	

Die Konfusionsmatrix zeigt für die Messungen aus der Praxis Genauigkeiten nahe 100% (siehe Tabelle 13), mit sehr kleinen Fehlern für die Mischtextilien mit Anteil CO/PES = 80/20.

Das Modell wurde schließlich auf den Testdatensatz angewendet. Die Ergebnisse der Validierung für jede Probe zeigen, dass die unbekanntes Textilien korrekt in ihren jeweiligen Klassen erkannt wurden. Dies bestätigt die Fähigkeit des Modells, verschiedene Textiltypen anhand ihrer Zusammensetzung und Eigenschaften zuverlässig zu identifizieren.

Zusätzlich zur Klassifizierung der Textilien als Ganzes wurde auch eine pixelweise Vorhersage durchgeführt. Das bedeutet, dass jeder einzelne Bildpunkt einer bestimmten Klasse zugeordnet wurde. Die Konfusionsmatrix zeigt für die Messungen aus der Praxis Genauigkeiten nahe 100%.

Die Ergebnisse der Validierung sind in Tabelle 14 dargestellt. Diese Tabelle zeigt die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Modelle sowohl pro Probe als auch Pixel für Pixel.

Tabelle 14: Klassenvorhersagen für den Test-Datensatz.

Sample	Group	Image	Material	Material	Train/Test (Mate... ▾)
M0014	Real Time 2			 COPES5050	
M0015	Real Time 2			 COLY4060	
M0016	Real Time 2			 PES100	
M0017	Real Time 2			 CO100	
M0019	Real Time 2			 LYPES5050	
M0020	Real Time 2			 COPES8020	
M0021	Real Time 2			 COPES8020	
M0022	Real Time 2			 COPES8020	
M0023	Real Time 2			 PES100	

Die Validierungsläufe haben bestätigt, dass die Modellvorhersagen mit den tatsächlichen Messergebnissen übereinstimmen, was die Robustheit und Zuverlässigkeit der entwickelten Modelle unterstreicht. Die in Tabelle 3 festgelegten Kategorien von Textilzusammensetzungen können somit zweifelsfrei erkannt werden.

#### 4.4 Aufbau einer wiederholbaren Kreislauffähigkeit durch chemische Qualitätsbewertung (AP 4)

##### 4.4.1 Qualitätsbeurteilung von Cellulosefasern vor und nach Nutzungs- bzw. Waschzyklen (AP 4.1)

Um die Qualität der Cellulosefasern vor und nach den Waschzyklen beurteilen zu können, wurden die Original-Textilien zunächst optisch mit Hilfe der Licht- oder Rasterelektronen-Mikroskopie (REM) beurteilt. Abbildung 30 zeigt als Beispiel REM-Aufnahmen der Probe B7 (50% Refibra™, 50% PET) in ungewaschenem, 30-mal gewaschenem (inkl. vorher jeweils genutzten) und insgesamt 100-mal gewaschenem Zustand.

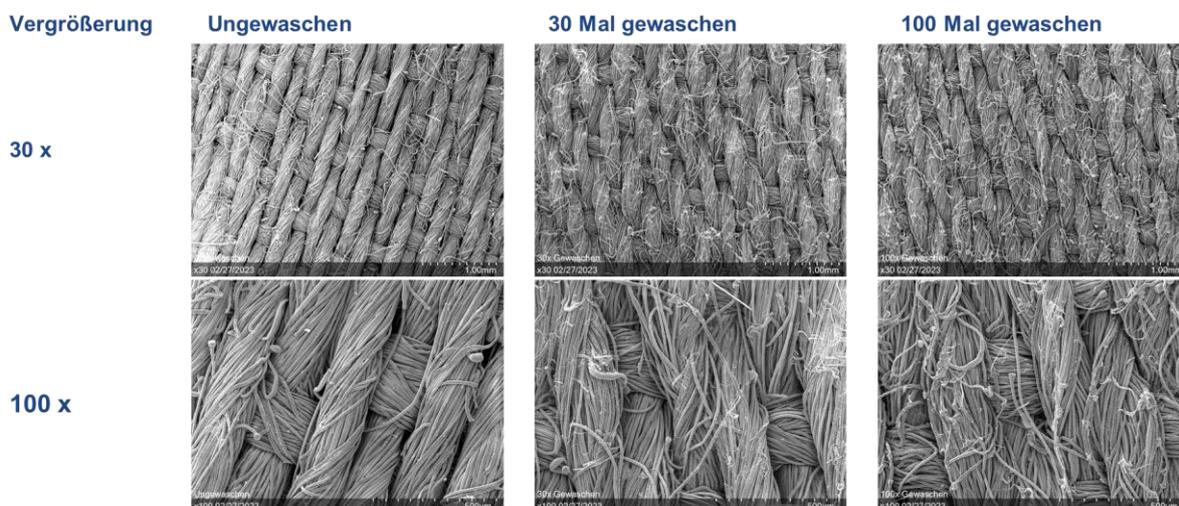


Abbildung 30: REM-Aufnahmen der ungewaschenen, 30-mal gewaschenen (inkl. vorher jeweils genutzten) und bis zu 100-mal gewaschenen Probe B7 (50% Refibra, 50% PET).

Die Oberfläche der Probe wird mit zunehmender Zahl der Waschzyklen rauer, die Fasern selber sind jedoch auch nach 100 Wäschen noch intakt.

Ergänzend zu den NIR-spektroskopischen Untersuchungen an der HSRT wurden die Proben am FTB zusätzlich in Hinsicht auf ihre chemische Zusammensetzung durch FTIR-Spektroskopie analysiert. Mit dieser Methode werden die funktionellen Gruppen von chemischen Verbindungen erfasst. Die entstehenden Spektren sind charakteristisch für jedes Material. Bereits Abweichungen von 1% in der Zusammensetzung eines Mischgewebes können im Optimalfall detektiert werden. Die FTIR-Spektren der im Projekt verwendeten Ausgangsmaterialien CO, Lyocell und PET sowie die Zuordnung der wichtigsten Signale der Spektren zu den Stoffen sind in Abbildung 31 dargestellt. Um die Homogenität der Mischgewebe zu beurteilen, wurden jeweils 10 ATR-FTIR-Spektren an unterschiedlichen Stellen der Probe mit je 40 Scans an einem IR-Tracer 100 von Shimadzu aufgenommen. Die gemessene Fläche pro Messung liegt bei ca. 2 mm x 2 mm. Ein Beispiel ist in Abbildung 32 zu sehen.

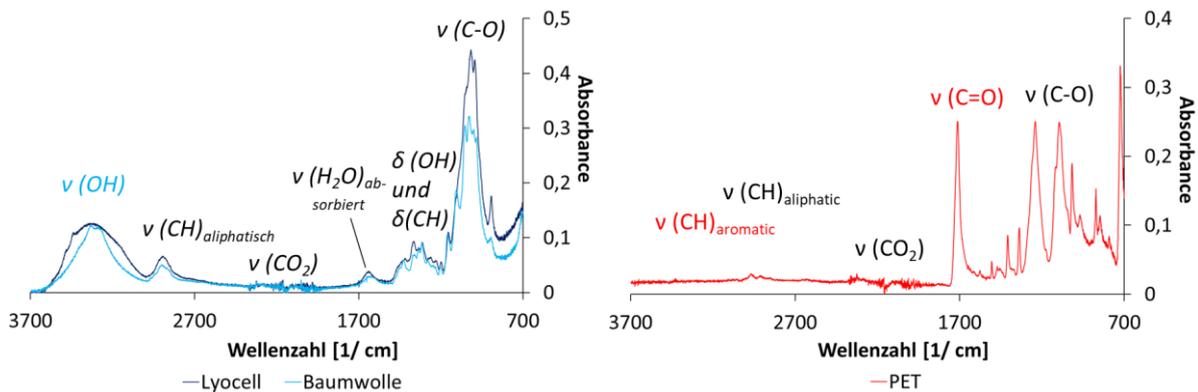


Abbildung 31: FTIR-Spektren der im Projekt verwendeten Ausgangsmaterialien Baumwolle, Lyocell (links) und PET (rechts), sowie die Zuordnung der wichtigsten Signale der Spektren zu den Stoffen.

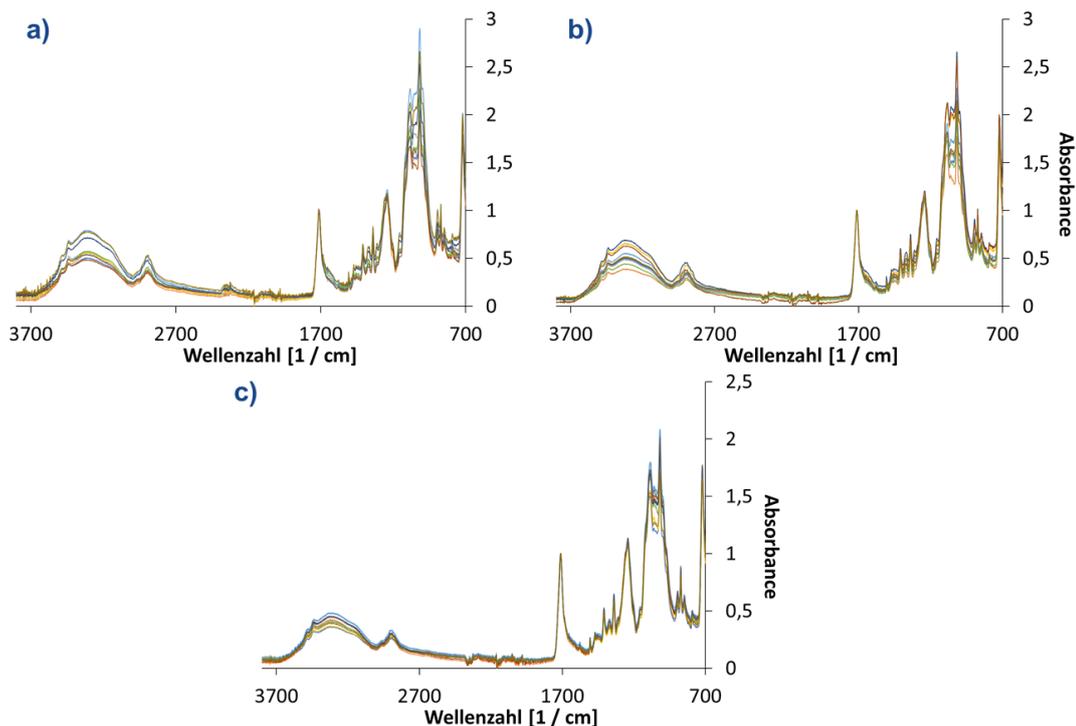


Abbildung 32: Normierte FTIR-Spektren der Probe B7, a) ungewaschen, b) 30-mal gewaschen, c) 100-mal gewaschen.

Die Spektren wurden normiert, so dass die Signalintensitäten für jede Probe direkt miteinander vergleichbar sind. Sie zeigen unabhängig von der Zahl der Waschzyklen eine breite Variation der Signalintensitäten, was vor allem im Bereich von  $3100\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$  erkennbar ist. In diesem Bereich sind die Banden der Valenzschwingung von Hydroxylgruppen zu finden. Diese stammen aus der Cellulose. Das Verhältnis von den Lyocell-Fasern (aus Refibra™-Zellstoff) und PET, das insgesamt bei 50:50 liegt, ist also nicht überall im Gewebe homogen verteilt.

Ein ähnliches Ergebnis wurde auch für die anderen untersuchten Proben erhalten. Die Spektren befinden sich im Anhang 2.

#### **4.4.1.1 Abtrennung und physikalisch-chemische Charakterisierung des Celluloseanteils der untersuchten Textilien (AP 4.1.1)**

Für eine weitergehende Analyse der cellulosischen Bestandteile, mussten diese vom PET-Anteil getrennt werden. Hierfür konnten im Prinzip zwei verschiedene Methoden angewandt werden: zum einen die Trennung nach Dichte der Materialien, wofür die Proben hätten gemahlen und die wässrige Dispersion anschließend hätte zentrifugiert werden müssen. Zum anderen lässt sich ausnutzen, dass die beiden Polymere in verschiedenen Lösemittelsystemen unterschiedliche Löslichkeiten aufweisen (siehe Abbildung 33). Das Cellulose-Lösemittel Cuoxam wurde zur Herstellung von Kunstseide genutzt und findet heute vor allem Anwendung zur Bestimmung des durchschnittlichen Polymerisationsgrades (DP) von Cellulose mit Hilfe der Kapillarviskosimetrie (siehe Abbildung 34 a). Das Messprinzip begründet sich darin, dass gelöste Polymere die Viskosität einer Lösung erhöhen, sogar wenn ihre Konzentration sehr niedrig ist. Diese Erhöhung ist dabei abhängig von der Konzentration und der Molmasse des Polymers. Der DP ist eins der wichtigsten Kriterien, ob die Cellulose für einen (weiteren) Spinnprozess, z. B. im Lyocell-Verfahren, noch geeignet ist.

Wurde eine Polycotton-Probe für 5 Tage in Cuoxam-Lösung gelegt, waren noch 2/3 des ursprünglichen PETs intakt. Nach 16 h, nach denen die löslichen Cellulosebestandteile sicher gelöst sind, konnte das PET des Mischgewebes in der erwarteten Menge – im Fall von B7 z. B. 50% der Ursprungsprobe – zurückgewonnen werden (siehe Abbildung 34 b und Anhang 1). Dazu wurden PET und weitere unlösliche Bestandteile aus der Lösung abfiltriert (siehe Abbildung 35 a und b), der Filterkuchen ausgewaschen und zusammen mit dem Filtrat durch Schwefelsäure sauer gestellt (pH 3-4, siehe Abbildung 35 c und d). Die so ausgefällte Cellulose wurde erneut abfiltriert und neutral gewaschen. Ist ein Teil der Cellulose durch Weichgriffmittel oder sonstige Ausrüstungen nicht löslich, so zeigt sich das daran, dass der PET-Rest eine deutliche Blaufärbung aufweist, und/oder in Gelpartikeln und Faserbruchstücken, die eine Messung des DP durch Kapillarviskosimetrie unmöglich machen (siehe Abbildung 34 c). Die optischen Beobachtungen ließen sich durch FTIR-Spektroskopie bestätigen, die blaugefärbten PET-Reste zeigten auch Cellulosesignale, Proben ohne Färbung entsprachen reinen PET-Spektren.

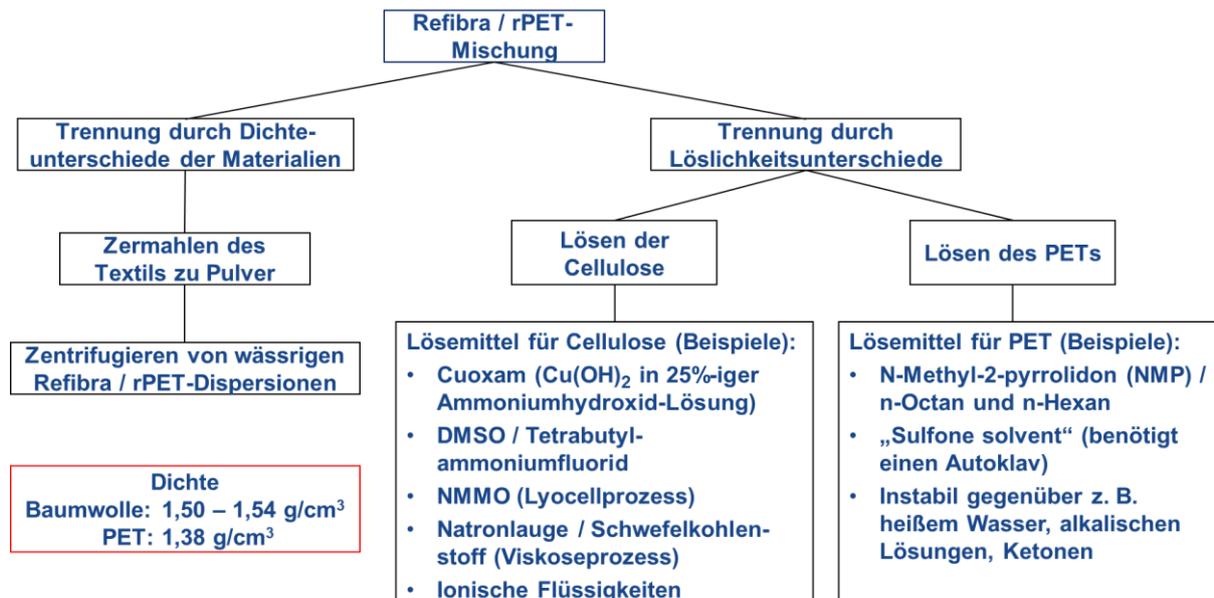


Abbildung 33: Möglichkeiten zur Trennung von cellulosischen und Polyester (PET)-Bestandteilen (Quelle: Römpp, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 81, 91–95, 2001).

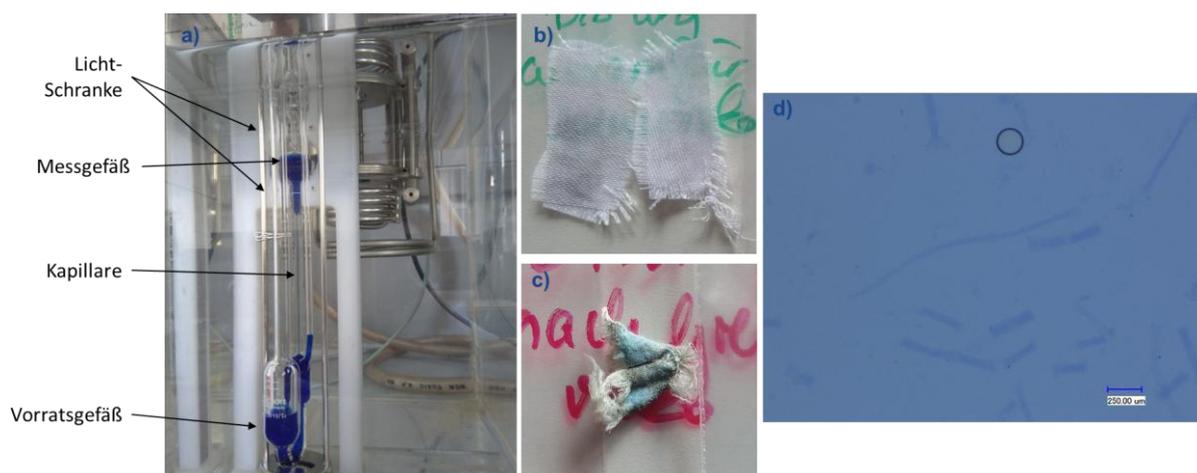


Abbildung 34: a) Kapillare zur Bestimmung der Grenzviskosität, b) PET-Reste von B7 nach dem Herauslösen der Cellulose, c) PET-Reste von B4 nach Herauslösen der Cellulose, d) lichtmikroskopische Aufnahme der Cuoxam-„Lösung“ von B4x0 (ungewaschen) mit Faserbruchstücken und Gelpartikeln (Quelle: FTB).

Die gelöste und zurückgewonnene Cellulose bildet farblose, homogene Filme, während der unlösliche Rückstand, der neben dem PET-Rest abgetrennt werden kann, Faserbruchstücke enthält und durch Verunreinigungen mit Kupfersalzen aus dem Lösemittel blau ist (siehe Abbildung 36 b). Diese lassen sich nicht weiter mit Wasser auswaschen. Ein Vergleich des normalisierten FTIR-Spektrums von gelöster und gefällter Bio-Baumwolle (B1x0), dem unlöslichen Rückstand und Lyocell zeigt, dass der unlösliche Rückstand zu einem großen Teil aus Cellulose besteht.

Eine Veränderung der Materialzusammensetzung wurde bei den untersuchten Proben, wenn die Löslichkeit des Baumwollanteils gegeben war, durch die Waschzyklen nicht beobachtet. Bei den Proben B4x100 und allen B7 Proben entspricht das Ergebnis dem der ursprünglichen Zusammensetzung.

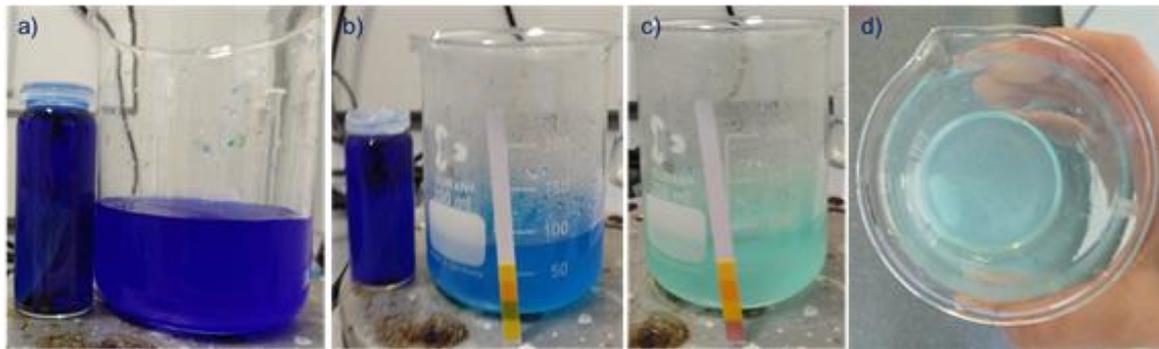


Abbildung 35: a) Cuoxamlösung vor und nach Entfernung des PET, b) Cuoxamlösung (pH 6-7), c) „Cuoxamlösung“ (pH 3-4), d) „Cuoxamlösung“ (pH 3-4) mit gefällter Cellulose (Quelle: FTB).

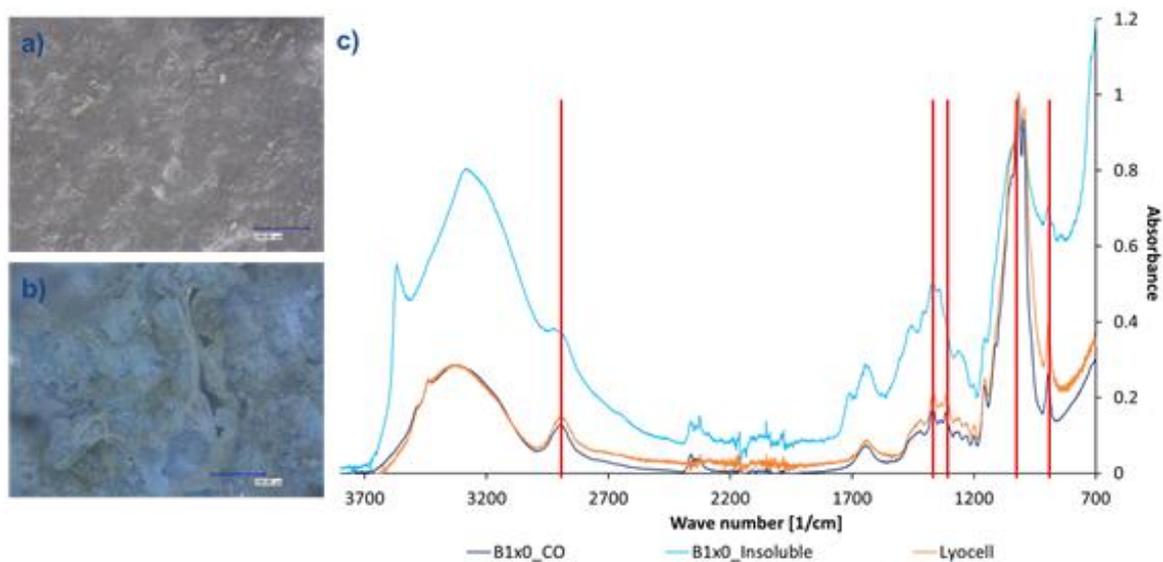


Abbildung 36: Mikroskopische Aufnahmen von a) gefällter Baumwolle und b) unlöslichem Rückstand, c) FTIR-Spektrum des unlöslichen Rückstands (B1x0\_insoluble) im Vergleich zu Baumwolle (B1x0\_CO) und Lyocell. Senkrechte Striche: Beispiele für übereinstimmende Signale in den Spektren.

#### 4.4.1.2 Bestimmung des Lösungsverhaltens und rheologischen Verhaltens von Celluloselösungen zur Eignung für Spinnversuche (AP 4.1.2)

Die Proben, für die sich der DP mit Hilfe der Kapillarviskosimetrie bestimmen lässt, liegen als homogene Lösung in Cuoxam vor. Löst sich eine Cellulose in einem Lösemittel, ist auch zu erwarten, dass sie in anderen Lösemitteln wie NMMO für das Lyocell-Verfahren löslich ist. Die Ergebnisse der ersten DP-Bestimmungen sind in Tabelle 15 aufgeführt. Die Bestimmung des DP erfolgte nach D. Klemm et al.<sup>1</sup>

Für einen (weiteren) Recyclingloop muss der Celluloseanteil nicht nur löslich sein, sondern sollte auch einen DP von mindestens 500 aufweisen. So besitzt eine Probe des originalen Refibra™-Pulps von Södra einen DP von 601 (bei 20°C bestimmt). Dieser Wert ist bei den baumwollhaltigen Proben auch nach 100 Waschzyklen sogar immer noch höher, so dass diese für einen Spinnprozess noch weiter depolymerisiert werden müssten.

<sup>1</sup> D. Klemm, B. Philipp, T. Heinze, U. Heinze, W. Wagenknecht, Comprehensive Cellulose Chemistry: Vol. I: Fundamentals and Analytical Methods; Wiley-VCH: Weinheim, Germany, 1998, 234.

Tabelle 15: Durchschnittlicher Polymerisationsgrad (DP) des Celluloseanteils der Proben gemessen nach D. Klemm et al.

Probe	Material	DP <sub>ungewaschen</sub>	DP <sub>einmal gewaschen</sub>	DP <sub>100-mal gewaschen</sub>
<b>B1</b>	100% CO Bio	Gelpartikel	Gelpartikel	Gelpartikel
<b>B2</b>	80% CO / 20% PES	Gelpartikel	Gelpartikel	867
<b>B3</b>	60% Tencel / 40% CO	Gelpartikel	Gelpartikel	774
<b>B4</b>	50% CO / 50% PES	nicht vollständig löslich	nicht vollständig löslich	2 von 3 Proben: Gelpartikel
<b>B5</b>	50% CO / 50% PES	657	nicht existent	nicht existent
<b>B7</b>	50% Refibra / 50% PES	358	355 (30-mal gewaschen)	319

In den beiden Polycottonproben B5 und WW1 lässt sich die Baumwolle bereits als Neuware lösen, bei allen anderen Proben verbleiben unlösliche Rückstände. Die nur partielle Löslichkeit der Produkte wird dabei mindestens zu einem Teil durch die verwendeten Veredlungs- oder Vorbehandlungschemikalien bestimmt. Neben Weichgriffmitteln, oft auf Silikonbasis, sind dies auch z. B. Farbstoffe, optische Aufheller, Antischaum- oder Benetzungsmittel bei Färbungen und Ausrüstungen. Der Einfluss von Ausrüstungsmittelklassen auf die Löslichkeit von Cellulose wurde am Beispiel von silikonhaltigen Weichgriffmitteln untersucht. Alle Proben wurden mit diesen Mitteln, wenn auch von unterschiedlichen Herstellern, ausgerüstet. Der Siliziumgehalt der Oberfläche der ungewaschenen Materialien, der mittels energiedispersiver Elektronenspektroskopie (EDX) bestimmt wurde, liegt bei 4 Proben unterhalb der Nachweisgrenze, bei zwei Proben bei 0,06% bzw. 0,09% (B3x0 bzw. B1x0) (siehe Tabelle 16). B5x0 ist die einzige Probe, bei der die Baumwolle schon ungewaschen vollständig löslich ist, obwohl sie ebenfalls mit Weichgriffmittel behandelt ist. Diese Art Ausrüstungsmittel führt also nicht automatisch zu einer schlechteren Löslichkeit.

Tabelle 16: Einfluss von silikonhaltigen Weichgriffmitteln auf die Löslichkeit der Materialien in Cuoxam.

Probe	Material	Ausrüstung mit Weichgriffmitteln	Silizium [Atom%]*	Löslichkeit in Cuoxam
<b>B1x0</b>	100% CO Bio	ja	0,09	Faserstücke und Gelpartikel
<b>B2x0</b>	80% CO / 20% PES	ja	0,00	unvollständig
<b>B3x0</b>	60% Tencel / 40% CO	ja	0,06	Faserstücke und Gelpartikel
<b>B4x0</b>	50% CO / 50% PES	ja	0,00	nur teilweise
<b>B5x0</b>	50% CO / 50% PES	ja	0,00	vollständig
<b>B7x0</b>	50% Refibra / 50% PES	unbekannt	0,00	vollständig

\* bestimmt durch energiedispersive Elektronenspektroskopie (EDX)

Nach 100 Waschzyklen ist bei keiner Probe mehr Silizium nachweisbar. Neben Weichgriffmitteln wurden auch noch zahlreiche andere Veredlungsmittel eingesetzt, die nur in geringen Konzentrationen auf dem Textil appliziert werden und mit den verwendeten Analysemethoden nicht erfasst werden können. Gerade bei nur semipermanenten Ausrüstungen werden durch die Waschprozesse zumindest Teile der Veredlung entfernt. Dies zeigt sich auch an der Löslichkeit des Baumwollanteils in Cuoxam, die sich mit zunehmender Zahl an Waschzyklen bei allen Proben (B1-B4) verbessert, auch wenn sie nach 100 Wäschen noch nicht bei allen Proben immer vollständig erreicht wird. Die Abhängigkeit zeigt jedoch auf, dass Löslichkeit in Cuoxam zu einem großen Teil durch die verwendeten Veredlungsmittel (mit)bestimmt wird.

Die Abtrennung der cellulosischen Bestandteile unterschiedlicher (Alt-)Textilien ist prinzipiell erfolgreich. Der Erfolg wird jedoch eingeschränkt durch eine oft nur partielle Löslichkeit des Baumwollanteils, der mit hoher Wahrscheinlichkeit durch die verwendeten Textilveredlungsmittel entsteht. Diese chemische Charakterisierung und deren Ergebnisse sollen zur Kalibrierung der NIR-Erkennungen zur Verfügung stehen.

Die Bestimmungen des DP der in Cuoxam löslichen Proben zeigen allerdings deutlich, dass der Baumwollanteil der Proben in der Regel noch einen so hohen DP besitzt, dass er für Spinnprozesse nach dem Lyocellverfahren eher noch weiter hydrolysiert werden müsste. Die Refibra™-Proben hingegen sind bereits in der Neuware so weit abgebaut, dass ein weiteres Verspinnen zu einem Textil auf Schwierigkeiten stoßen kann. Hier wären andere Verwertungsmethoden z. B. als mikrokristalline Cellulose für Füllstoffe oder auch für Fermentationsprozesse sinnvoll, wie sie z. B. bei der Firma Recell (Recell Group B.V., Groningen, Niederlande) genutzt werden. Wenn auch ein mechanisches Recycling bedingt durch die Faserqualität nicht mehr in Frage kommt, können solche Optionen noch eine Lösung sein.

#### **4.4.2 Abgleich/Korrelation der chemischen Analyse von Cellulose mit den spektroskopischen Erkennungsdaten für die Textilsortierung (Materialvalidierung) (AP 4.2)**

Die gemessenen Spektren (sowohl NIR- als auch FTIR-Spektren) und die Ergebnisse der chemischen Analyse stimmen weitgehend überein, ebenso mit den Datenblättern der Hersteller der Produkte. Die Details sind in Kap. 4.4.1 bereits mit aufgeführt. Die für die Textilsortierung vom Projektpartner HSRT genutzte NIR-Hyperspektralanalyse erkennt die Waren, misst dabei aber größere Flächen. Die Auflösung, die erreicht werden kann, hängt von der Geschwindigkeit der an der Kamera vorbeigeführten Textilien ab. Dadurch ist eine punktuelle Inhomogenität in der Materialzusammensetzung, wie sie in der ATR-FTIR-Spektroskopie (siehe Spektren in Anhang 2) mit einer Messfläche von 2x2 mm<sup>2</sup> erfasst werden, für eine praktische Sortierung selber unproblematisch.

Die auf den Textilien applizierten Hilfs- und Ausrüstungsmittel, die die chemische Analyse und das Lösen der cellulosischen Anteile erschweren und zu Unterschieden in den Ergebnissen in den Löseversuchen geführt haben, liegen in Konzentrationen vor, die unterhalb der Erfassungsgrenzen von FTIR- oder NIR-Spektroskopie liegen. Um diese zu detektieren, wäre eine aufwendige Spurenanalytik notwendig. Zudem werden mehrere Vorbehandlungs- und

Veredlungschemikalien auf dem gleichen Textil eingesetzt, die evtl. auch miteinander reagieren könnten. Diese Spurenanalytik konnte im Rahmen des Projektes nicht mehr geleistet werden, ist jedoch für die Sicherstellung eines erfolgreichen Detektier- und Sortierprozesses der Textilwaren nicht erforderlich.

#### **4.4.3 Entwicklung von Lösungen für eine weitere Recyclingfähigkeit durch „Design for Circularity“ (AP 4.3)**

„Design for Recycling“ im Textilbereich wurde sowohl allgemein als auch für verschiedene Produktgruppen veröffentlicht. Hierbei wird meist vor allem in Hinsicht auf die verwendeten textilen Grundlagen gedacht. So lässt sich ein Monomaterial, das mit wenigen Nähten gefertigt wurde und möglichst wenige Fremdstoffe wie Reißverschlüsse enthält, vom Grundsatz her leichter recyceln als Produkte aus einem Materialmix wie Polycotton. Mittlerweile gibt es jedoch auch hierfür Ansätze, z. B. bei den Firmen eeden GmbH ([www.eeden.world](http://www.eeden.world)), Circ ([www.circ.earth](http://www.circ.earth)) oder Worn Again Technologies ([www.wornagain.co.uk](http://www.wornagain.co.uk)) sowie in verschiedensten Publikationen, bei denen versucht wird, beide Komponenten aus CO/PET-Mischungen wiederzugewinnen.<sup>2,3,4,5,6,7,8,9,10</sup>

Bei synthetischen Polymeren wie PET ist es möglich, die Moleküle bis zum Monomer zu hydrolysieren und anschließend neu zu kondensieren.<sup>11</sup> Bei diesem Vorgehen ist das recycelte Polymer nicht vom Virgin-Material unterscheidbar. Cellulose kann jedoch nur durch Pflanzen oder Bakterien hergestellt werden – bei einer Aufarbeitung oder Trennung der Cellulose aus einem gemischten Material muss die Polymerkette daher für ein Faser-zu-Faser-Recycling auf jeden Fall soweit erhalten bleiben, dass die Herstellung einer Spinnlösung mit geeigneter Konzentration, Viskosität und Homogenität möglich ist. Dabei liegt der optimale DP für den Lyocell-Prozess zwischen 550 bis 650.<sup>12</sup> Die untersuchte Baumwolle hat auch noch nach 100 Waschzyklen einen deutlich höheren DP, so dass sie für einen Spinnprozess

---

<sup>2</sup> R. Mantsch et al., Production of cellulose from cotton or cotton blends, WO002023155957A1, 2023.

<sup>3</sup> F.G. Barla et al., Methods for recycling cotton and polyester fibers from waste textiles, US20200407530A1, 2020.

<sup>4</sup> A. Walker, Process for extracting polyester from an article, WO2014045062A1, 2013.

<sup>5</sup> A. Walker et al., Recycling process, WO2020221932A1, 2020.

<sup>6</sup> L. Liu et al., Recycling of full components of polyester/cotton blends catalyzed by betaine-based deep eutectic solvents, J. Environ. Chem. Eng., 10, 107512, 2022.

<sup>7</sup> S. Haslinger et al., Upcycling of cotton polyester blended textile waste to new man-made cellulose fibers, Waste Management, 97, 2019, 88-96.

<sup>8</sup> Palme et al., Development of an efficient route for combined recycling of PET and cotton from mixed fabrics, Text. Cloth. Sustain. 3, 4, 2017.

<sup>9</sup> P. Schneider, Recycling von Mischgeweben aus Baumwolle und PET – Prozessentwicklung und Kostenschätzung, Masterarbeit, Technische Hochschule Köln, 2019.

<sup>10</sup> H. Wu et al., Efficient recycle of waste polycotton and preparation of cellulose and polyester fibers using the system of ionic liquid and dimethyl sulfoxide, J. Mol. Liq., 388, 122757, 2023.

<sup>11</sup> L. C. Franco et al., revolPET®: An innovative “back-to-monomer” recycling technology for the open loop value chain of PET and polyester composite packaging and textiles. In: H. Kohl et al. (Eds.): GCSM 2022, LNME, 2023, 175–183.

<sup>12</sup> B. Kosan et al., Suitable dissolving pulps and their impacts on solution spinning of cellulose man-made fibers, Cellulose, 31, 2024, 1941-1955.

erst noch abgebaut werden muss. Dies lässt auf der einen Seite einen Spielraum sogar für aggressive Entfernungsmethoden von Textilveredlungsmitteln, führt aber durch den massiven Kettenabbau der Moleküle zu einer Einschränkung für weitere Faser-zu-Faser-Recyclingloops.

Zur Herstellung der im Projektverlauf untersuchten Polycottonprobe mit Refibra<sup>TM</sup>-Fasern wurde eine Mischung von Holzzellstoff und bis zu 30% Baumwolle aus Alttextilen verwendet. Dieses Material wies nach 100 Waschzyklen nur noch einen DP von 319 auf, der für das Ausspinnen neuer Fasern nach dem Lyocellverfahren alleine nicht mehr geeignet ist. Es kann in einem zweiten Recyclingkreislauf vielleicht noch als Beimischung zu neuem Zellstoff verwendet werden. Weitere Verwertungsmöglichkeiten, z. B. als Ausgangsmaterial für mikrokristalline Cellulose, Ethanol oder sogar Wasserstoff, könnten zudem sinnvolle Alternativen sein.

Die Ergebnisse der Löseversuche im Verlauf von KICKup zeigen zudem, dass sogar in ungefärbten B2B-Textilien mit bekannter Zusammensetzung die Möglichkeiten zu einem chemischen Recycling durch Ausrüstungsmittel begrenzt werden. Ein „Design for Circularity“ muss daher – nicht nur für Baumwolltextilien – auf jeden Fall auch den Einsatz von Textilveredlungsmitteln miteinschließen. Die dadurch erreichte Textilausrüstung sollte im Idealfall während des Produktlebens permanent sein und auch 100 Waschzyklen überstehen, sich aber gleichzeitig auch für die Möglichkeit zu einem chemischen Recycling mit geringem Aufwand entfernen lassen. Nicht zuletzt durch die große Anzahl möglicher eingesetzter Mittel und Mischungen davon besteht hier weiterhin ein großer Forschungsbedarf.

#### **4.5 Entwicklung geeigneter Transaction Certificates inkl. Datenbankaufbau (AP 5)**

Die im Textilservice eingesetzten Textilien sind oft mit Qualitätszertifikaten versehen und geben Auskunft über eingesetzte Materialien und Chemikalien. Hier soll im engen Austausch mit Recyclingunternehmen die Möglichkeit erarbeitet werden, die dort anzuliefernden Alttextilien mit einem „Transaction Certificate“ (TC) nach Art eines digitalen europäischen Produktpasses zu versehen. Dies sorgt dafür, den Recyclingprozess transparenter und effizienter zu gestalten. Verbraucher und andere Stakeholdern können so fundierte Entscheidungen auf Basis der Herkunft und der Umweltauswirkungen von Textilien treffen.

Ziel ist es, dass der Recycler seiner Pflicht nachkommen und den Ursprung der Recyclingmaterialien (z. B. als definierte Post-Consumer-Abfälle) nachweisen kann. Anhand der TCs erhält der Recycler entsprechende Materialinformationen (Faserzusammensetzung, Einsatz von Chemikalien wie Farbstoffen und Ausrüstungsmitteln), kann die Herkunft und Transportwege der Produkte rückverfolgen, erhält Angaben über deren Gewichte und kann dem Textilservice die abgelieferte Ware nachweisen. Mit diesem Nachweis erhält der Textilservice wiederum die Bestätigung für eine fachgerechte Entsorgung und kann diese bei den Lokalbehörden melden. Die TCs sollen u. a. bei Ein- und Auslagerung der in Kapitel 4.3.3 selektierten Alttextilbehältnisse über Auslesen einer dort angebrachten RFID-Erkennung die jeweiligen Datensätze erzeugen und zum Aufbau einer entsprechenden Datenbank dienen. Hier gilt es, die logistischen Prozessschritte zum Aufbau einer Produktpass-Datenbank mit den not-

wendigen Produktinformationen zu initiieren. Anhand der so gewonnenen Daten können auch gleichzeitig die mit den Recyclingumsätzen verbundenen Logistikemissionen kalkuliert werden.

Diese Umsetzung birgt jedoch auch eine Reihe von Herausforderungen. Einer der größten Hürden ist die Entwicklung und Implementierung eines **standardisierten Systems** für die Erfassung und Verwaltung der notwendigen Daten, das von allen beteiligten Parteien einschließlich Textilserviceanbietern und Recyclingunternehmen akzeptiert und genutzt wird. **Die Komplexität der Datenintegration**, insbesondere im Hinblick auf die unterschiedlichen Materialien und Chemikalien, stellt ebenfalls eine Herausforderung dar. Zudem sind **Datenschutz- und Datensicherheitsfragen** zu berücksichtigen, um die Vertraulichkeit der Informationen zu gewährleisten. Ein weiteres Problem ist, dass die derzeit eingesetzten RFID-Technologien **keine detaillierten Rückschlüsse auf die Lieferkette und deren Zertifikate** zulassen. Das bedeutet, dass die Informationen, die für eine vollständige Rückverfolgbarkeit erforderlich sind, bisher nicht vollständig erfasst und gespeichert werden können. Darüber hinaus könnten **technische Schwierigkeiten** bei der Implementierung und Nutzung von RFID-Technologien auftreten, insbesondere wenn es darum geht, diese in bestehende Betriebsabläufe zu integrieren. Schließlich bedarf es einer umfassenden Schulung und Anpassung der Prozesse, um sicherzustellen, dass das System effizient und effektiv genutzt wird.

#### **4.5.1 Anforderungen und Rahmenbedingungen**

##### **4.5.1.1 Anforderungen an Transaction Certificates**

Die TCs müssen spezifische Anforderungen erfüllen, um eine effektive Nachverfolgbarkeit und Transparenz zu gewährleisten. Diese Anforderungen umfassen:

- **Detaillierte Materialangaben:** Informationen über die Faserzusammensetzung, chemische Behandlungen und andere relevante Materialeigenschaften.
- **Herkunftsinformationen:** Angabe des Ursprungs der Materialien, einschließlich der Produktionsstätten und -länder.
- **Rückverfolgbarkeitsdaten:** Informationen über die Lieferkette, die die Bewegung der Materialien vom Ausgangspunkt bis zum Recycling dokumentieren.
- **Umwelt- und Sicherheitsdaten:** Informationen über die Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen der verwendeten Chemikalien und Materialien.
- **Gewichts- und Mengenangaben:** Angaben zu den Gewichten und Mengen der Materialien, um eine genaue Bilanzierung zu ermöglichen.
- **Standardisierung:** Einheitliche Formate und Standards für die Daten, um die Integration und Nutzung der TCs durch verschiedene Akteure zu erleichtern.
- Daten zum **Lebenszyklus** (Anzahl der Wäschen)

#### 4.5.1.2 Technologische Grundlagen (RFID, Software)

Um die Anforderungen an die TCs zu erfüllen, sind technologische Grundlagen notwendig:

- **RFID-Technologie:** Radio Frequency Identification (RFID) ermöglicht die automatisierte Erfassung und Verfolgung von Daten. Diese RFID-Tags **müssen langlebig, industriell waschbar, zuverlässig** und in der Lage sein, große Datenmengen zu speichern. Im Textilservice ist der Einsatz von RFID bereits weit verbreitet. Allerdings ist nur ein Teil der im Umlauf befindlichen Textilien mit RFID-Tags ausgestattet, da günstigere Artikel aus Kostengründen oft nicht markiert werden. Dadurch bleibt **ein großer Anteil der Textilien im Textilservice nicht gechipt** und kann nicht automatisch verfolgt werden. Ein weiteres potenzielles Problem ist die **Funkenbildung**, die in Recyclingunternehmen auftreten kann (beim Schreddern) und eine Brand- oder Explosionsgefahr darstellt. Dieser Aspekt wird noch von der Eeden GmbH in Münster unter Einsatz einer Testmenge von 2 Tonnen untersucht.
- **Datenmanagement-Software:** Softwarelösungen zur Verwaltung, Verarbeitung und Analyse der erfassten Daten sind erforderlich. Diese Software muss die Daten aus den RFID-Tags auslesen, in einer zentralen Datenbank speichern und die Informationen benutzerfreundlich darstellen können.
- **Schnittstellen und Integration:** Die Software muss über Schnittstellen verfügen, die eine nahtlose Integration in bestehende Systeme und Plattformen ermöglichen, um eine effiziente Datenverarbeitung und -nutzung zu gewährleisten.

Nachfolgend ein **Schaubild**, das die beteiligten Organisationen darstellt. Erstellt und besprochen wurde das mit dem Unternehmen Datamars SA, ein führender Anbieter von RFID-Technologie. Alle Organisationen müssten eine gemeinsame „Datasphere“ nutzen. Das könnte eine Datenbank sein, die den Anforderungen des Digitalen Produktpasses der EU entspricht.

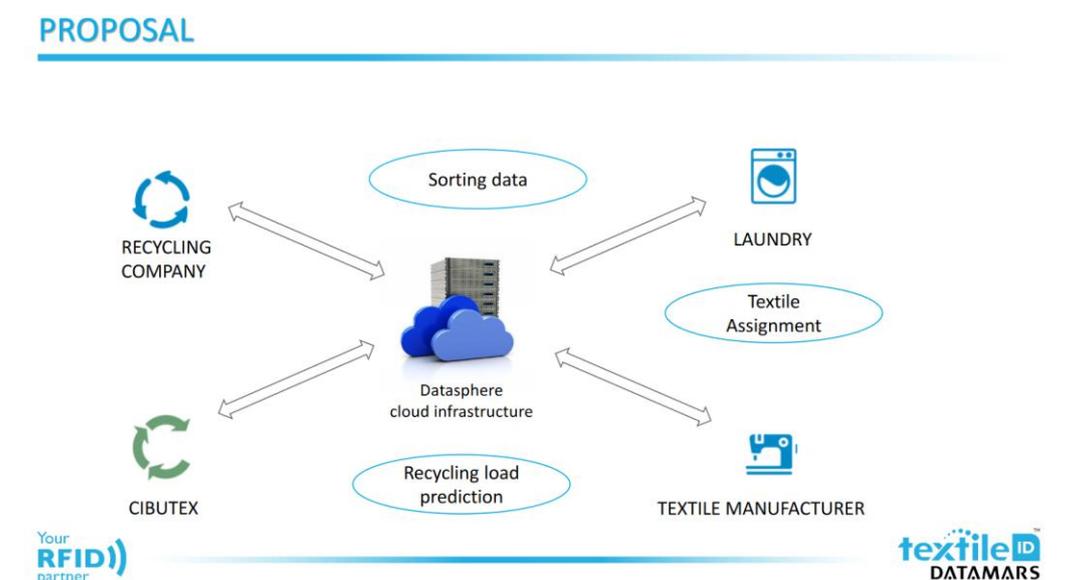


Abbildung 37: Überblick beteiligter Organisationen der Lieferkette zur gemeinsamen Datennutzung (Quelle: Präsentation von Datamars Textile ID für CIBUTEX).

#### **4.5.1.3 Gesetzliche und regulatorische Anforderungen (z. B. EU-Vorgaben)**

Die Entwicklung und Implementierung von TCs muss im Einklang mit den geltenden gesetzlichen und regulatorischen Vorgaben erfolgen. Dies beinhaltet:

- **Datenschutzbestimmungen:** Einhaltung der Datenschutzgesetze, um die Vertraulichkeit und Sicherheit der erfassten Daten zu gewährleisten.
- **Umweltvorschriften:** Berücksichtigung von Umweltvorschriften, die den Einsatz bestimmter Chemikalien oder Materialien regulieren.
- **Kennzeichnungspflichten:** Einhaltung der Kennzeichnungspflichten, um sicherzustellen, dass die TCs die erforderlichen Informationen klar und verständlich vermitteln.
- **EU-Vorgaben und Normen:** Berücksichtigung europäischer Normen und Richtlinien, insbesondere im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft und der Rückverfolgbarkeit von Produkten.

Die Einhaltung dieser Anforderungen und Rahmenbedingungen ist entscheidend für den Erfolg der Umsetzung und die Akzeptanz der TCs durch alle beteiligten Parteien.

**Digitale Produktpässe und EU-Vorschriften:** Die EU hat Vorschriften für den sog. digitalen Produktpass (DPP) eingeführt, die für verschiedene Branchen, einschließlich der Textilindustrie, relevant sind. Diese Vorschriften sollen sicherstellen, dass alle Produkte umfassend dokumentiert sind, um ihre Rückverfolgbarkeit und Transparenz zu gewährleisten. Der digitale Produktpass enthält wichtige Informationen über das Produkt, einschließlich seiner Materialzusammensetzung, des Einsatzes von Chemikalien und der Herkunft. Die Einhaltung dieser Vorschriften ist entscheidend, um den Anforderungen der EU an die Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit gerecht zu werden. Die Implementierung eines solchen digitalen Produktpasses stellt jedoch technische und logistische Herausforderungen dar, insbesondere in Bezug auf die Standardisierung und Integration in bestehende Systeme.

#### **Hindernisse und Schwierigkeiten:**

- **Regulatorische Hürden:** Die Vielzahl unterschiedlicher nationaler und internationaler Vorschriften kann es schwierig machen, ein einheitliches System zu etablieren, das alle rechtlichen Anforderungen erfüllt.
- **Anpassung an sich ändernde Vorschriften:** Da gesetzliche und regulatorische Anforderungen sich ändern können, ist es eine Herausforderung sicherzustellen, dass das System ständig aktuell und konform bleibt.
- **Bis heute gibt es noch keine einheitliche Richtlinie, wie der DPP gestaltet sein soll.**

## **4.5.2 Entwicklung der Transaction Certificates**

### **4.5.2.1 Definition der notwendigen Datenfelder für Transaction Certificates**

Die TCs müssen spezifische Datenfelder enthalten, um eine umfassende und präzise Nachverfolgbarkeit der Textilien zu gewährleisten. Diese Datenfelder umfassen:

- **Faserzusammensetzung:** Detaillierte Angaben zu den verwendeten Fasern, einschließlich Art, Herkunft und Anteil an der Gesamtzusammensetzung. Dies ermöglicht eine genaue Identifikation der Materialien und unterstützt die Nachhaltigkeitsbewertung.
- **Chemikalieneinsatz:** Informationen über alle verwendeten Chemikalien, wie Farbstoffe, Bleichmittel, Weichmacher und andere Ausrüstungsmittel. Diese Daten sind entscheidend, um die Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen der Textilien zu bewerten und gesetzliche Anforderungen zu erfüllen.
- **Produktionsinformationen:** Angaben zur Produktionsstätte, einschließlich Standort, Herstellungsdatum und Produktionscharge. Diese Informationen helfen, den Ursprung und die Produktionsbedingungen der Textilien nachzuvollziehen.
- **Logistik- und Lieferkettendaten:** Details zu den Transportwegen und den involvierten Logistikdienstleistern. Diese Informationen unterstützen die Rückverfolgbarkeit der Textilien von der Produktion bis zum Endverbraucher oder Recycler.

### **4.5.2.2 Implementierung von RFID-Technologie zur Datenerfassung**

Die RFID-Technologie spielt eine zentrale Rolle bei der automatisierten Datenerfassung für die TCs. Die Implementierung umfasst mehrere Schritte:

- **Auswahl geeigneter RFID-Tags:** Die Tags müssen robust und in der Lage sein, die notwendigen Daten zu speichern. Sie sollten langlebig, industriell waschbar und kosteneffizient sein, um eine breite Anwendung zu ermöglichen, einschließlich in preisgünstigeren Textilien.
- **Installation von RFID-Lesegeräten:** Diese Geräte müssen strategisch in den Produktions- und Logistikprozessen platziert werden, um die Daten von den RFID-Tags effizient zu erfassen. Dies schließt auch die Implementierung von Antennen ein, um eine zuverlässige Erfassung zu gewährleisten.
- **Datensicherheit:** Sicherstellung, dass die RFID-Daten sicher erfasst und übertragen werden, um Datenschutzbestimmungen einzuhalten und die Integrität der Daten zu schützen.

### **4.5.2.3 Softwareentwicklung zur Verwaltung und Verarbeitung der Daten**

Für die effektive Verwaltung und Verarbeitung der durch RFID und andere Quellen gesammelten Daten ist eine maßgeschneiderte Softwarelösung erforderlich:

- **Datenbankentwicklung:** Aufbau einer zentralen Datenbank zur Speicherung der gesammelten Daten, die eine schnelle und effiziente Abfrage und Analyse ermöglicht.

Die Datenbank muss skalierbar sein, um mit dem wachsenden Datenvolumen Schritt zu halten.

- **Benutzeroberfläche:** Entwicklung einer intuitiven Benutzeroberfläche, die den Zugriff auf die TCs erleichtert und Benutzern ermöglicht, die Daten schnell zu analysieren und Berichte zu erstellen.
- **Integration und Schnittstellen:** Die Software muss nahtlos in bestehende IT-Infrastrukturen und Systeme integriert werden können. Dies beinhaltet die Entwicklung von Schnittstellen zu Enterprise-Resource-Planning-Systemen (ERP-Systemen), Lieferkettenmanagement-Software und anderen relevanten Plattformen.
- **Sicherheits- und Compliance-Features:** Implementierung von Sicherheitsprotokollen, um den Zugriff auf die Daten zu kontrollieren und sicherzustellen, dass die Verarbeitung der Daten den geltenden Datenschutz- und Sicherheitsstandards entspricht.

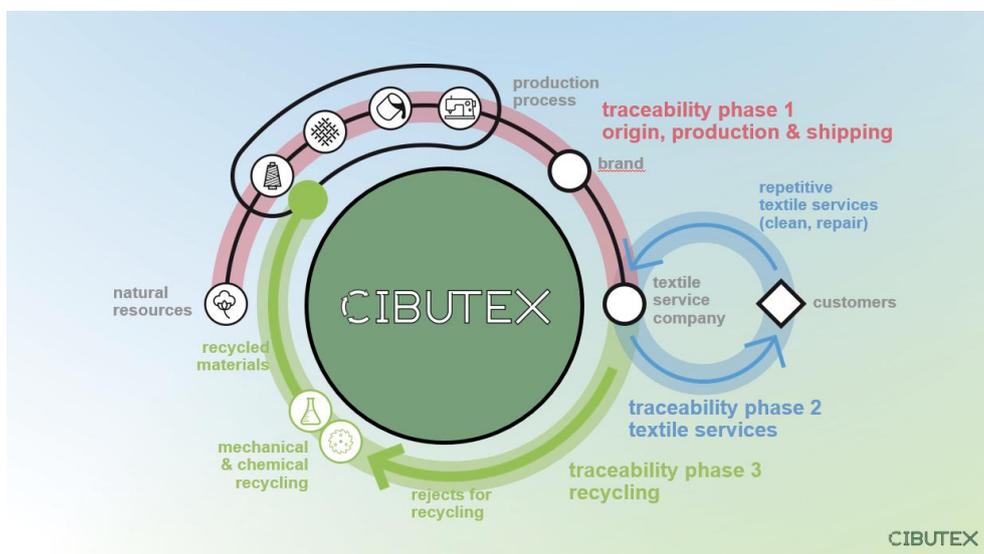


Abbildung 38: Darstellung verschiedener Phasen der Nachverfolgung in der kreislaufbasierten Textilwirtschaft (Quelle: CIBUTEX).

### 4.5.3 Zusammenarbeit mit Recyclingunternehmen

#### 4.5.3.1 Auswahl und Einbindung von Partnerunternehmen

Die Zusammenarbeit mit Recyclingunternehmen ist ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklung und Implementierung der TCs. Diese Unternehmen spielen eine zentrale Rolle bei der Sammlung und Verarbeitung von Alttextilien. Der erste Schritt besteht darin, geeignete Partner auszuwählen und in das Projekt einzubinden:

- **Identifikation potenzieller Partner:** Ermittlung von Recyclingunternehmen, die über die notwendige Infrastruktur und Erfahrung in der Verarbeitung von Textilien verfügen. Ein Beispiel für mögliche Partner sind das Unternehmen Södra und dessen Vorstufe Frankenhuis B.V., das sich auf die Rückgewinnung von Fasern spezialisiert hat.

- **Kooperationsvereinbarungen:** Aushandeln von Kooperationsvereinbarungen, die die Ziele und Verantwortlichkeiten der Partnerunternehmen klar definieren. Diese Vereinbarungen sollen sicherstellen, dass alle Beteiligten die Anforderungen und Erwartungen an die TCs verstehen und unterstützen.
- **Integration in das Projekt:** Die Recyclingunternehmen werden aktiv in den Entwicklungsprozess eingebunden, um sicherzustellen, dass ihre Bedürfnisse und Anforderungen an die TCs berücksichtigt werden. Dies umfasst regelmäßige Meetings und Feedbackschleifen, um den Austausch zu fördern und die Zusammenarbeit zu stärken.

#### ***4.5.3.2 Definition der Anforderungen an die Transaction Certificates seitens der Recyclingunternehmen***

Recyclingunternehmen haben spezifische Anforderungen an die Informationen, die in den TCs enthalten sein müssen. Diese Anforderungen werden gemeinsam definiert und umfassen:

- **Materialinformationen:** Detaillierte Angaben zur Faserzusammensetzung und den verwendeten Materialien, die für die Recyclingprozesse relevant sind. Diese Informationen helfen den Recyclingunternehmen, die Materialien effizient zu trennen und zu verarbeiten.
- **Chemikalienangaben:** Informationen über den Einsatz von Chemikalien in den Textilien, einschließlich Farbstoffen, Bleichmitteln und anderen Ausrüstungsmitteln. Diese Angaben sind entscheidend für die Einhaltung von Umwelt- und Sicherheitsvorschriften sowie für die Planung der Recyclingprozesse.
- **Herkunfts- und Logistikdaten:** Daten über die Herkunft der Textilien und deren Transportwege, die den Recyclingunternehmen helfen, die Lieferkette zu verstehen und die Nachverfolgbarkeit der Materialien sicherzustellen.

#### ***4.5.3.3 Prozesse zur Übermittlung und Verifizierung der Daten durch die Recyclingunternehmen***

Die Zusammenarbeit mit den Recyclingunternehmen erfordert klare Prozesse für die Übermittlung und Verifizierung der in den TCs enthaltenen Daten. Diese Prozesse umfassen:

- **Datenübertragungsprotokolle:** Festlegung von sicheren und effizienten Protokollen für die Übermittlung der TCs an die Recyclingunternehmen. Dies kann die Nutzung von digitalen Plattformen oder direkt integrierten Systemen beinhalten.
- **Verifizierung der Daten:** Entwicklung von Mechanismen zur Verifizierung der in den TCs enthaltenen Informationen. Die Recyclingunternehmen müssen sicherstellen, dass die Daten korrekt und vollständig sind, um die Materialien effizient verarbeiten zu können.
- **Rückmeldung und Anpassungen:** Etablierung von Feedbackschleifen, in denen die Recyclingunternehmen Rückmeldungen zu den erhaltenen Daten geben können. Die-

se Rückmeldungen werden genutzt, um die TCs kontinuierlich zu verbessern und sicherzustellen, dass sie den Anforderungen der Recyclingprozesse entsprechen.

#### **4.5.4 Datenbankaufbau und Integration**

##### **4.5.4.1 Konzeption und Struktur der Produktpass-Datenbank**

Der Aufbau einer zentralen Datenbank ist entscheidend für die Verwaltung und Verfügbarkeit der TCs. Diese Datenbank wird als Produktpass-Datenbank bezeichnet und enthält alle relevanten Informationen zu den Textilprodukten. Die Konzeption und Strukturierung der Datenbank umfassen folgende Schritte:

- **Datenbankdesign:** Entwurf einer flexiblen und skalierbaren Datenbankarchitektur, die eine effiziente Speicherung und Abfrage der TCs ermöglicht. Die Datenbank muss in der Lage sein, große Datenmengen zu verarbeiten und sollte so strukturiert sein, dass sie leicht erweitert werden kann, um zukünftige Anforderungen abzudecken.
- **Datenkategorien und -felder:** Festlegung der Hauptkategorien und spezifischen Datenfelder, die in der Datenbank gespeichert werden sollen. Dazu gehören Informationen wie Faserzusammensetzung, Chemikalieneinsatz, Herkunfts- und Produktionsdaten sowie Logistikdetails.
- **Benutzerrollen und Zugriffsrechte:** Definition der verschiedenen Benutzerrollen und der entsprechenden Zugriffsrechte, um die Sicherheit und Integrität der Daten zu gewährleisten. Dies umfasst die Festlegung, wer Daten einsehen, bearbeiten oder löschen kann.

##### **4.5.4.2 Integration der RFID-Daten in die Datenbank**

Die Integration der RFID-Daten ist ein zentraler Aspekt des Datenbankaufbaus, da RFID-Tags eine wichtige Quelle für Echtzeitdaten über Textilien sind. Die Schritte zur Integration umfassen:

- **Datenübertragungsmechanismen:** Entwicklung von Schnittstellen und Protokollen zur automatischen Übertragung der RFID-Daten in die Produktpass-Datenbank. Dies beinhaltet die Konfiguration von RFID-Lesegeräten zur Erfassung und Weiterleitung der Daten.
- **Datenverknüpfung:** Sicherstellung, dass die RFID-Daten korrekt mit den entsprechenden Einträgen in der Datenbank verknüpft sind. Dies ermöglicht eine nahtlose Nachverfolgung der Textilien von der Produktion bis zum Recycling.
- **Automatisierung und Echtzeit-Updates:** Implementierung von Systemen zur automatischen Aktualisierung der Datenbank in Echtzeit, sobald neue RFID-Daten erfasst werden. Dies sorgt dafür, dass alle relevanten Informationen stets aktuell und genau sind.

#### **4.5.4.3 Sicherstellung der Datenqualität und -integrität**

Die Qualität und Integrität der Daten in der Produktpass-Datenbank sind von entscheidender Bedeutung für die Zuverlässigkeit des gesamten Systems. Maßnahmen zur Sicherstellung der Datenqualität und -integrität umfassen:

- **Validierungsprotokolle:** Entwicklung von Mechanismen zur automatischen Validierung der eingegebenen Daten, um Fehler zu erkennen und zu korrigieren. Dies kann Plausibilitätsprüfungen und Abgleichungen mit Referenzdaten umfassen.
- **Datenbereinigungsverfahren:** Regelmäßige Überprüfung und Bereinigung der Datenbank, um veraltete, doppelte oder inkonsistente Daten zu entfernen. Dies hilft, die Datenbank auf dem neuesten Stand zu halten und ihre Effizienz zu maximieren.
- **Sicherheitsmaßnahmen:** Implementierung umfassender Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz der Daten vor unbefugtem Zugriff, Verlust oder Manipulation. Dazu gehören Verschlüsselungstechnologien, regelmäßige Sicherheitsupdates und Backups.
- **Audits und Qualitätskontrollen:** Durchführung regelmäßiger Audits und Qualitätskontrollen, um die Einhaltung der festgelegten Standards zu überprüfen und sicherzustellen, dass die Datenbank zuverlässig und sicher bleibt. Dies umfasst auch die Schulung des Personals im Umgang mit den Daten und der Datenbank.

#### **4.5.5 Logistische Prozessschritte**

##### **4.5.5.1 Ablaufbeschreibung der Erfassung und Speicherung von Alttextil-Informationen**

Die Erfassung und Speicherung von Informationen über Alttextilien ist ein entscheidender Schritt zur Sicherstellung der Nachverfolgbarkeit und Transparenz im Recyclingprozess. Dieser Ablauf umfasst:

- **Erfassung der Alttextilien:** Sobald die Alttextilien im Textilservice ankommen, werden sie gescannt und mit RFID-Tags versehen, falls dies noch nicht geschehen ist. Diese Tags enthalten grundlegende Informationen wie Materialzusammensetzung, Herkunft und Produktionsdetails.
- **Initiale Datenaufzeichnung:** Die RFID-Lesegeräte erfassen die Daten der Tags und übertragen sie in die zentrale Produktpass-Datenbank. Hier werden die Datenfelder mit Informationen wie Faserarten, chemischen Behandlungen und eventuellen Qualitätszertifikaten gefüllt.
- **Speicherung und Verwaltung:** Die erfassten Daten werden in der Datenbank gespeichert, wo sie für weitere Verarbeitungsschritte und zur Rückverfolgung bereitstehen. Dies umfasst die Organisation und Kategorisierung der Daten, um einen schnellen und einfachen Zugriff zu ermöglichen.

#### **4.5.5.2 Rückverfolgung der Produkte vom Textilservice bis zum Recycler**

Die Rückverfolgung der Produkte ist ein integraler Bestandteil des Recyclingprozesses und ermöglicht es, die Herkunft und die Behandlung der Textilien bis zum Recycler nachzuvollziehen. Dieser Prozess umfasst:

- **Verfolgung der Lieferkette:** Über die RFID-Tags kann der Weg jedes einzelnen Textils vom Textilservice bis zum Recycler nachverfolgt werden. Dies beinhaltet den Transportweg, die Zwischenstationen und die Verantwortlichen in jedem Schritt.
- **Übermittlung der TCs an den Recycler:** Bei der Ankunft der Textilien beim Recycler werden die TCs zusammen mit den Textilien übermittelt. Diese Zertifikate enthalten alle relevanten Informationen, die der Recycler benötigt, um die Materialien ordnungsgemäß zu verarbeiten, einschließlich der Materialzusammensetzung und des Chemikalieneinsatzes.
- **Datenvalidierung durch den Recycler:** Der Recycler überprüft die TCs, um die Genauigkeit und Vollständigkeit der Daten sicherzustellen. Dies kann auch den Abgleich der Informationen mit den physischen Eigenschaften der Textilien umfassen.

#### **4.5.5.3 Prozessoptimierung und Automatisierung**

Um die Effizienz und Genauigkeit der logistischen Prozesse zu maximieren, ist eine kontinuierliche Optimierung und Automatisierung erforderlich. Diese Maßnahmen umfassen:

- **Automatisierte Erfassung und Verarbeitung:** Implementierung von automatisierten Systemen zur Erfassung und Verarbeitung der Daten, die mit den RFID-Tags gesammelt werden. Dies reduziert den manuellen Aufwand und minimiert das Risiko von Fehlern.
- **Optimierung der Transportlogistik:** Analyse und Optimierung der Transportwege und -methoden, um die Effizienz zu steigern und die Umweltbelastung zu minimieren. Dies kann durch die Nutzung optimierter Routen, die Verbesserung der Ladeprozesse und die Zusammenarbeit mit spezialisierten Logistikunternehmen erfolgen.
- **Kontinuierliche Verbesserung:** Einführung eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses, der auf den Rückmeldungen der beteiligten Akteure basiert. Dies kann die Anpassung der Datenbankstrukturen, die Verbesserung der RFID-Technologie und die Verfeinerung der Prozessschritte umfassen, um eine noch genauere und effizientere Nachverfolgbarkeit zu gewährleisten.

Durch diese logistischen Prozessschritte wird sichergestellt, dass alle relevanten Informationen zu den Alttextilien erfasst, gespeichert und nachvollziehbar gemacht werden können. Dies unterstützt nicht nur die Recycler bei ihrer Arbeit, sondern trägt auch zur Transparenz und Nachhaltigkeit der gesamten Lieferkette bei.

#### **4.5.6 Nachweis und Reporting**

##### **4.5.6.1 Erstellung von Berichten für Recycler und Textilservicebetriebe**

Die Erstellung detaillierter Berichte ist essenziell, um die Transparenz und Nachverfolgbarkeit der Alttextilien im Recyclingprozess sicherzustellen. Diese Berichte dienen sowohl den Recyclingunternehmen als auch dem Textilservice zur Dokumentation und Analyse. Die wesentlichen Elemente umfassen:

- **Datenübersicht:** Zusammenstellung aller relevanten Informationen aus den TCs, einschließlich Materialzusammensetzung, eingesetzter Chemikalien und Produktionsdetails. Diese Übersicht ermöglicht es, den gesamten Lebenszyklus der Textilien nachzuvollziehen.
- **Prozessdokumentation:** Beschreibung der durchgeführten Schritte bei der Sammlung, Sortierung und Weiterverarbeitung der Textilien. Hier werden auch die Ergebnisse aus den Testphasen und die Leistungsbewertung der eingesetzten Technologien aufgeführt.
- **Analyse und Insights:** Bereitstellung von Analysen, die bspw. aufzeigen, welche Materialien häufig recycelt werden, welche chemischen Substanzen besonders problematisch sind oder wie effizient die Transportlogistik gestaltet ist. Diese Erkenntnisse können zur Optimierung zukünftiger Prozesse genutzt werden.

##### **4.5.6.2 Bestätigungen und Nachweise für fachgerechte Entsorgung**

Eine fachgerechte Entsorgung von Textilien ist aus rechtlichen und ökologischen Gründen entscheidend. Die Erstellung von Bestätigungen und Nachweisen umfasst:

- **Zertifikate der Entsorgung:** Ausstellung von Zertifikaten, die bestätigen, dass die Alttextilien gemäß den geltenden Vorschriften und Standards entsorgt oder recycelt wurden. Diese Zertifikate sind wichtig, um den ordnungsgemäßen Abschluss des Recyclingprozesses nachzuweisen.
- **Dokumentation der Recyclingquoten:** Angabe der Mengen an recycelten Materialien und der daraus resultierenden Produkte. Dies beinhaltet auch die Aufschlüsselung nach Materialarten und chemischen Bestandteilen, um die Einhaltung von Umweltstandards zu dokumentieren.
- **Rückverfolgbarkeitsnachweise:** Bereitstellung von Dokumenten, die die vollständige Rückverfolgbarkeit der Textilien belegen. Diese Nachweise sind wichtig, um die Herkunft der Materialien und deren Verbleib transparent darzustellen.

##### **4.5.6.3 Berichterstattung**

Die Berichterstattung ist ein wichtiger Aspekt der Transparenz und Rechenschaftspflicht. Diese Berichte tragen dazu bei, das Vertrauen in den Recyclingprozess zu stärken und die Einhaltung gesetzlicher Vorgaben zu dokumentieren:

- **Regulatorische Berichte:** Erstellung von Berichten, die den Anforderungen lokaler, nationaler und internationaler Behörden entsprechen. Diese Berichte können Informationen über Recyclingmengen, Umweltauswirkungen und die Einhaltung von Vorschriften enthalten.
- **Stakeholder-Kommunikation:** Entwicklung maßgeschneiderter Berichte für verschiedene Stakeholder, wie Kunden, Investoren, NGOs und andere Interessengruppen. Diese Berichte informieren über die Nachhaltigkeitsbemühungen, die Recyclingprozesse und die Ergebnisse der Umweltbewertungsmaßnahmen.
- **Transparenzinitiativen:** Aktive Teilnahme an Transparenzinitiativen, indem relevante Daten und Erkenntnisse öffentlich zugänglich gemacht werden. Dies kann die Veröffentlichung von Nachhaltigkeitsberichten, die Teilnahme an Branchenkonferenzen oder die Zusammenarbeit mit Umweltorganisationen umfassen.

Durch diese Maßnahmen im Bereich Nachweis und Reporting wird sichergestellt, dass alle Prozessbeteiligten umfassend informiert sind und dass der gesamte Recyclingprozess transparent und nachvollziehbar dokumentiert wird. Dies trägt nicht nur zur Einhaltung von Vorschriften bei, sondern fördert auch das Vertrauen der Öffentlichkeit und anderer Stakeholder in die Nachhaltigkeit der Textilwirtschaft.

#### **4.5.7 Ausblick und Weiterentwicklung**

##### **4.5.7.1 Weiterentwicklung der Transaction Certificates und RFID-Technologien**

Die ständige Weiterentwicklung der TCs und der RFID-Technologien ist entscheidend, um mit den sich wandelnden Anforderungen und dem technologischen Fortgang Schritt zu halten. In diesem Kontext sind folgende Aspekte besonders wichtig:

- **Technologische Innovation:** Erforschung und Integration neuer RFID-Technologien, die höhere Datenkapazitäten, verbesserte Leseentfernungen und erhöhte Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen bieten. Dies könnte die Einführung von UHF-RFID-Tags oder neuen Sensortechnologien umfassen, die zusätzliche Daten wie Temperatur oder Feuchtigkeit erfassen können.
- **Erweiterte Datenfelder:** Ausbau der Datenfelder in den TCs, um detailliertere Informationen zu erfassen, wie etwa die ökologischen Fußabdrücke der verwendeten Materialien oder spezifische Verarbeitungs- und Herstellungsdetails. Dies ermöglicht eine präzisere Rückverfolgbarkeit und eine genauere Bewertung der Nachhaltigkeit der Produkte.
- **Interoperabilität und Standardisierung:** Förderung der Interoperabilität und Standardisierung der TCs und RFID-Systeme, um die Kompatibilität zwischen verschiedenen Systemen und Akteuren in der Lieferkette zu gewährleisten. Dies erleichtert die Integration in bestehende Systeme und unterstützt eine reibungslose Kommunikation und Datenübertragung.

- **Herausforderungen bei der RFID-Nutzung:** RFID-Tags verbrauchen Ressourcen bei der Herstellung und stellen eine zusätzliche Komplexität im Recyclingprozess dar. Derzeit gibt es keine umfassenden Systeme zur Wiederverwendung von RFID-Tags, und sie werden beim Recycling oft zerstört. Zudem besteht bei der mechanischen Zerkleinerung der Textilien die Gefahr von Funkenbildung, was ein potenzielles Explosionsrisiko darstellt

#### **4.5.7.2 Erweiterung des Systems auf weitere Produktkategorien**

Die bisher entwickelte Technologie und die Prozesse zur Erfassung und Verfolgung von Textilien können auf weitere Produktkategorien ausgeweitet werden, um eine umfassendere Nachhaltigkeitsstrategie zu unterstützen. Mögliche Erweiterungen umfassen:

- **Andere Textilarten und Bekleidungsstücke:** Ausweitung der TCs und RFID-Tags auf eine breitere Palette von Textilien, einschließlich Heimtextilien, Arbeitskleidung und speziellen funktionalen Textilien. Dies würde eine einheitliche Nachverfolgbarkeit über verschiedene Textilarten hinweg ermöglichen.
- **Nicht-Textilprodukte:** Erkundung der Anwendung dieser Technologien auf andere Produktkategorien, wie bspw. Schuhe, Accessoires oder sogar elektronische Geräte. Die Verfolgung der Lieferkette und der ökologischen Auswirkungen könnte so auf eine Vielzahl von Konsumgütern ausgedehnt werden.
- **Kreislaufwirtschaftsmodelle:** Unterstützung der Entwicklung von Kreislaufwirtschaftsmodellen durch die Integration von Informationen über Wiederverwendbarkeit, Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit in die TCs. Dies fördert eine nachhaltigere Nutzung und eine längere Lebensdauer der Produkte.

#### **4.5.7.3 Perspektiven für die europäische und internationale Ausweitung**

Die erfolgreichen Implementierungen der TCs und RFID-Systeme bieten eine starke Grundlage für eine Ausweitung auf europäischer und internationaler Ebene. Diese Perspektiven beinhalten:

- **Europäische Harmonisierung:** Zusammenarbeit mit europäischen Institutionen und Industrieverbänden, um gemeinsame Standards für TCs und RFID-Systeme zu entwickeln. Dies würde die Schaffung eines harmonisierten Marktes innerhalb der EU unterstützen und die grenzüberschreitende Nachverfolgbarkeit von Textilien und anderen Produkten verbessern.
- **Internationale Standards und Kooperationen:** Förderung internationaler Standards für die Rückverfolgbarkeit von Produkten, die den globalen Handel und die Einhaltung internationaler Umwelt- und Sozialstandards erleichtern. Kooperationen mit globalen Organisationen und Initiativen könnten dabei helfen, diese Standards zu etablieren.
- **Marktexpansion und Exportmöglichkeiten:** Analyse der Möglichkeiten zur Expansion in neue Märkte, insbesondere in Regionen mit steigendem Interesse an nachhaltigen

und transparenten Lieferketten. Die Einführung von TCs und RFID-Systemen in diesen Märkten könnte einen Wettbewerbsvorteil bieten und zur Förderung nachhaltiger Praktiken weltweit beitragen.

Insgesamt bietet die Weiterentwicklung und Ausweitung des Systems zahlreiche Chancen, die Nachhaltigkeit und Transparenz in der globalen Lieferkette zu fördern und gleichzeitig neue Märkte zu erschließen.

#### **4.5.8 Lösungsvorschläge zur Verfolgung/Transparenz der Warenströme nach Sortierung**

Dibella und CIBUTEX haben gemeinsam einen Lösungsansatz entwickelt, der den komplexen Anforderungen des aktuellen Marktes gerecht wird. Dieser Ansatz zielt darauf ab, eine umfassende Transparenz in der Lieferkette zu schaffen, die ökologischen und sozialen Auswirkungen des Textilrecyclings zu berechnen und diese Informationen in einem digitalen Produktpass zusammenzufassen. Schließlich wird eine zentrale Plattform bereitgestellt, die alle relevanten Daten und Prozesse integriert und zugänglich macht. Die Lösung gliedert sich in die folgenden Hauptbereiche:

- 1. Lieferkettentransparenz:** Hier werden Maßnahmen und Technologien vorgestellt, die eine lückenlose Rückverfolgbarkeit der Textilien entlang der gesamten Lieferkette ermöglichen.
- 2. Impactberechnung:** Dieser Abschnitt erläutert die Methoden zur Berechnung der ökologischen und sozialen Auswirkungen der Textilproduktion und -entsorgung.
- 3. Digitaler Produktpass inkl. Recycling-Impactberechnung:** Integration eines digitalen Produktpasses, der detaillierte Informationen über die Produkte und deren Recycling-Impact enthält.
- 4. Plattform:** Entwicklung einer zentralen Plattform, die alle Daten und Prozesse bündelt und eine effiziente Verwaltung und Auswertung ermöglicht.

Für die einzelnen Punkte werden Lösungen präsentiert sowie deren Vorteile und Nachteile dargestellt.

##### **1. Lieferkettentransparenz**

Im Markt gibt es diverse Lösungen zur Verbesserung der Transparenz in der Lieferkette, die sich auch deutlich im Preis unterscheiden. Für uns war es wichtig, eine Lösung zu finden, die ein günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis bietet und gleichzeitig flexibel genug ist, um die spezifischen Bedürfnisse unserer Anwender zu erfüllen.

Ein entscheidender Faktor war, dass die Anwender selbst ihre Lieferketten eintragen und verwalten können. Dies ermöglicht eine maßgeschneiderte Transparenz, die den individuellen Anforderungen gerecht wird. Darüber hinaus wollten wir sicherstellen, dass die Lösung vielseitige Möglichkeiten zur Darstellung und Nachverfolgung der Lieferkette bietet.

Nach sorgfältiger Prüfung verschiedener Optionen und in enger Zusammenarbeit mit unserem Projektpartner Lamme haben wir uns für die Lösung **Respect-Code** von Product DNA entschieden.<sup>13</sup> Diese Lösung erfüllt alle unsere Kriterien und bietet eine benutzerfreundliche Plattform zur Verwaltung und Nachverfolgung der gesamten Lieferkette.

In den folgenden Abschnitten werden die Funktionalitäten von Respect-Code detailliert erörtert, und es wird gezeigt, wie diese Lösung dazu beiträgt, die Transparenz in der Textilindustrie zu verbessern.

Als praktisches Beispiel für die Anwendung von Respect-Code sei hier das Produkt „Napkin Satin White“ (Code 685RUA0GA) angeführt. Wenn der zugehörige Code eingegeben wird, erhält der Nutzer erste Informationen über das Produkt, einschließlich des Herstellungslandes und der Verfügbarkeit (siehe Abbildung 39). Zudem werden wichtige Produktlabels angezeigt, die zusätzliche Transparenz über die Nachhaltigkeit und Qualität des Produkts bieten.

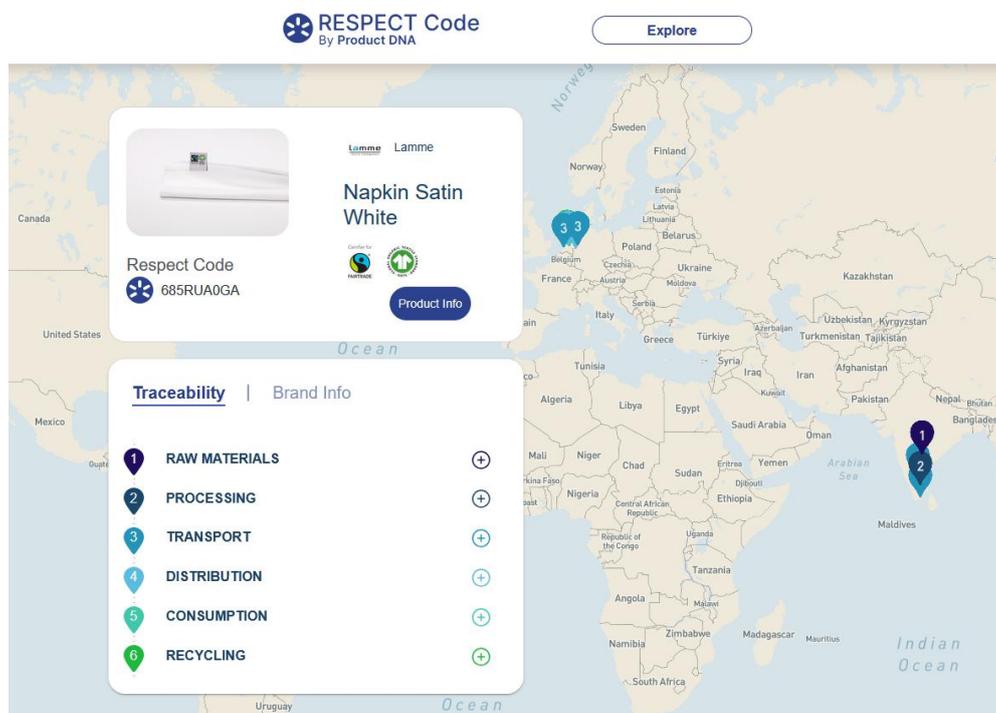


Abbildung 39: Web-Produktinformationen zum Beispielartikel „Napkin Satin White“ mit Respect-Code 685RUA0GA (Quelle: <https://www.respect-code.org/product/685RUA0GA>).

Die Lieferkette wird in den wichtigsten Produktionsschritten dargestellt. Beim Klick auf das „+“-Zeichen öffnen sich weitere Details, die tiefere Einblicke in den jeweiligen Produktionsschritt geben (siehe Abbildung 40). Durch weiteren Klick auf das „i“-Symbol kann man zusätzliche Informationen zu den beteiligten Produzenten abrufen. Es ist möglich, Textdateien (z. B. Impactberechnungen), Bilder, Videos und Verknüpfungen zu hinterlegen. Im Punkt 6 „Consumption and Recycling“ wird schließlich angegeben, dass das Produkt am Ende des Produktlebenszyklus über CIBUTEX dem Recycling zugeführt wird (siehe Abbildung 41). Hier wäre es möglich, das Recyclingverfahren im Detail darzustellen.

<sup>13</sup> <https://www.respect-code.org/brand/dibella-longlife-textiles>

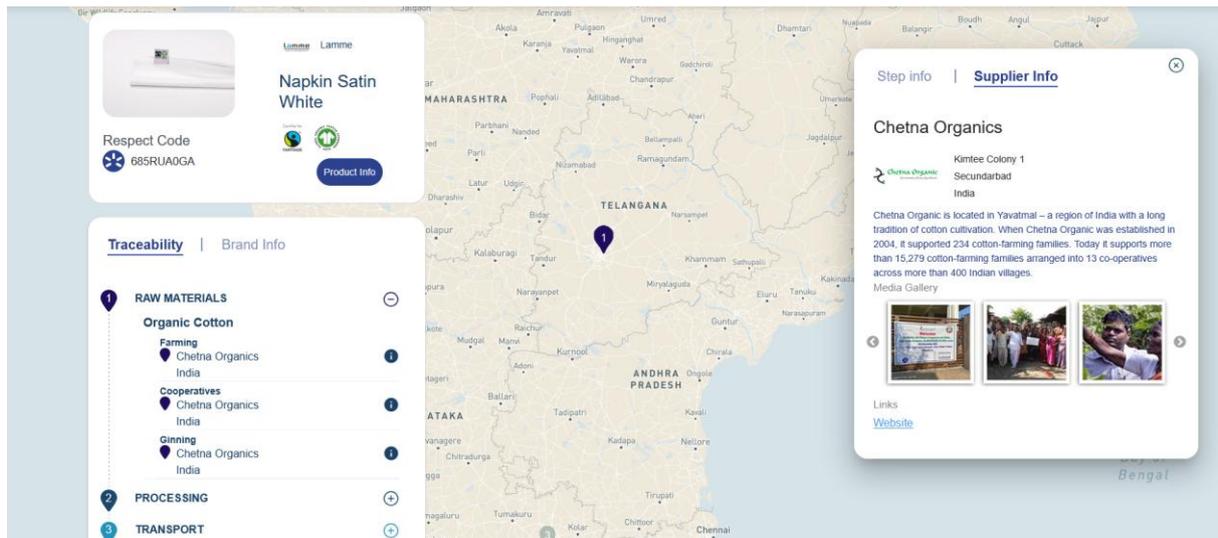


Abbildung 40: Beispieldarstellung weiterer Details eines Produktionsschrittes (hier Rohstoffe mit Herkunft) in Respect-Code.

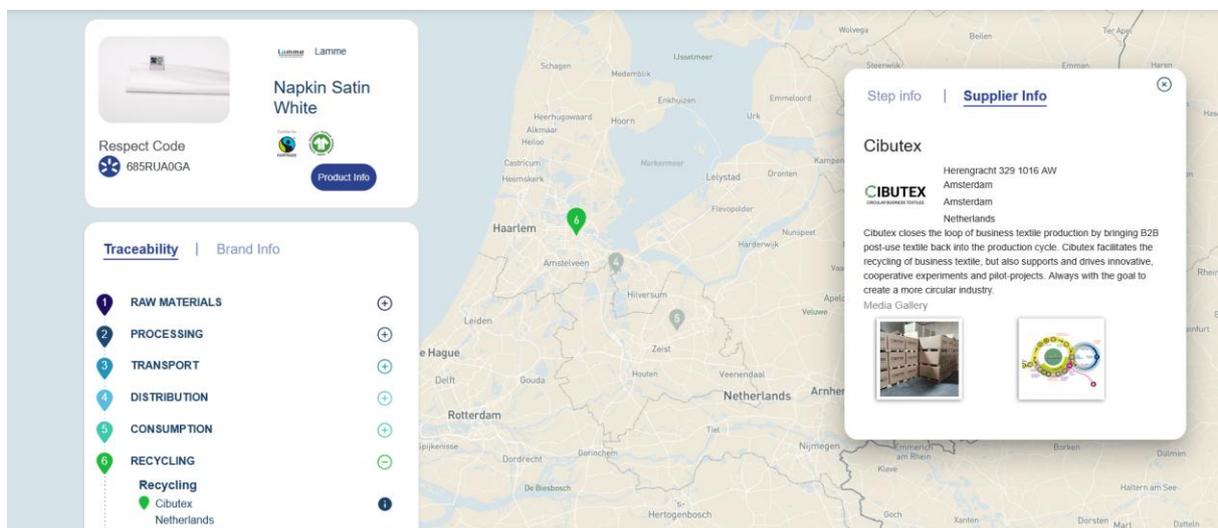


Abbildung 41: Beispieldarstellung mit Angaben zum Recycling in Respect-Code.

## Vorteile bei der Nutzung von Respect-Code

- **Benutzerfreundlichkeit:** Die Plattform ermöglicht es Anwendern, ihre Lieferketten einfach und effizient einzutragen und zu verwalten.
- **Transparenz:** Detaillierte Informationen über das Produkt und die Lieferkette werden bereitgestellt, einschließlich Herstellungsland, Verfügbarkeit und relevanter Produkt-labels.
- **Flexibilität:** Die Lösung ist anpassbar an die spezifischen Bedürfnisse der Anwender und kann verschiedene Arten von Produkten und Lieferketten abbilden.
- **Kosten-Effizienz:** Respect-Code bietet ein hervorragendes Preis-Leistungs-Verhältnis, das es auch kleinen und mittleren Unternehmen ermöglicht, Transparenz in ihrer Lieferkette zu erreichen.

## Nachteile und Herausforderungen bei der Nutzung von Respect-Code

- **Manueller Aufwand:** Die Anwender müssen die Lieferketteninformationen manuell eingeben und pflegen. Dies kann zeitaufwendig sein und erfordert genaue und kontinuierliche Aktualisierung der Daten.
- **Abhängigkeit von Informationen der Produzenten:** Die Qualität und Vollständigkeit der bereitgestellten Informationen hängt stark von der Transparenz und Kooperationsbereitschaft der beteiligten Produzenten ab. Wenn Produzenten keine detaillierten Informationen liefern, wird die Transparenz eingeschränkt.
- **Kosten für kleinere Unternehmen:** Obwohl Respect-Code ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis bietet, können die Kosten für kleinere Unternehmen immer noch eine Herausforderung darstellen, insbesondere wenn umfangreiche Datenpflege und Schulungen erforderlich sind.
- **Technische Herausforderungen:** Die Integration von Respect-Code in bestehende IT-Systeme und Prozesse kann technische Herausforderungen mit sich bringen. Unternehmen müssen sicherstellen, dass ihre Systeme kompatibel sind und möglicherweise Anpassungen vornehmen.
- **Datenschutz und Sicherheit:** Die Verwaltung und Speicherung großer Mengen sensibler Daten über Lieferketten und Produzenten erfordert robuste Datenschutz- und Sicherheitsmaßnahmen. Ein Verstoß gegen diese Maßnahmen könnte zu erheblichen Risiken führen.
- **Benutzerfreundlichkeit:** Obwohl die Plattform benutzerfreundlich ist, kann es eine Lernkurve geben, insbesondere für Benutzer, die weniger technikaffin sind oder keine Erfahrung mit solchen Systemen haben.
- **Eingeschränkte Reichweite:** Respect-Code deckt möglicherweise nicht alle globalen Lieferketten ab, insbesondere in Regionen, in denen digitale Infrastruktur und Transparenzstandards weniger entwickelt sind.

Diese Nachteile sollten bei der Entscheidung zur Implementierung von Respect-Code berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass die Lösung den spezifischen Anforderungen und Ressourcen des Unternehmens entspricht.

## 2. Impactberechnung

Auch im Bereich der Impactberechnung gibt es eine Vielzahl an Lösungen. Bei den meisten Lösungen wird jedoch der gesamte Lebenszyklus in Industrieläsbereichen oft nicht ausreichend berücksichtigt. Gerade der wiederholte Einsatz im Textilleasing hat erhebliche Auswirkungen auf die Impactberechnung. So wird Bettwäsche bspw. häufig über 100 Mal gewaschen, vom Endkunden abgeholt und wieder ausgeliefert.

Unsere bevorzugte Lösung ist **bAwear<sup>14</sup>**, da diese detaillierte Marktdaten aus dem Industriegewaschmarkt integriert. bAwear berücksichtigt die spezifischen Anforderungen und Besonderheiten des Textilleasingmarktes und bietet eine umfassende und präzise Berechnung der ökologischen Auswirkungen.

### Vorteile der bAwear-Lösung

- **Umfassende Lifecycle-Daten:** bAwear integriert detaillierte Daten zum Lebenszyklus von Textilien, einschließlich der vielfachen Nutzung und Reinigung in Industriegewaschereien.
- **Marktspezifische Informationen:** Die Lösung basiert auf umfangreichen Marktdaten aus dem Industriegewaschbereich, was zu genaueren und relevanteren Impactberechnungen führt.
- **Umfassende Impactfelder:** bAwear berücksichtigt verschiedene wichtige Impactfelder: „Global warming“, „Fossil energy“, „Water use“, „Land use“.

Nachfolgend ein Schaubild der gesamten Lieferkette, einschließlich Lifecycle und Recycling. Dabei wurden die genannten Impactfelder berücksichtigt, um eine ganzheitliche und detaillierte Analyse der ökologischen Auswirkungen zu ermöglichen.

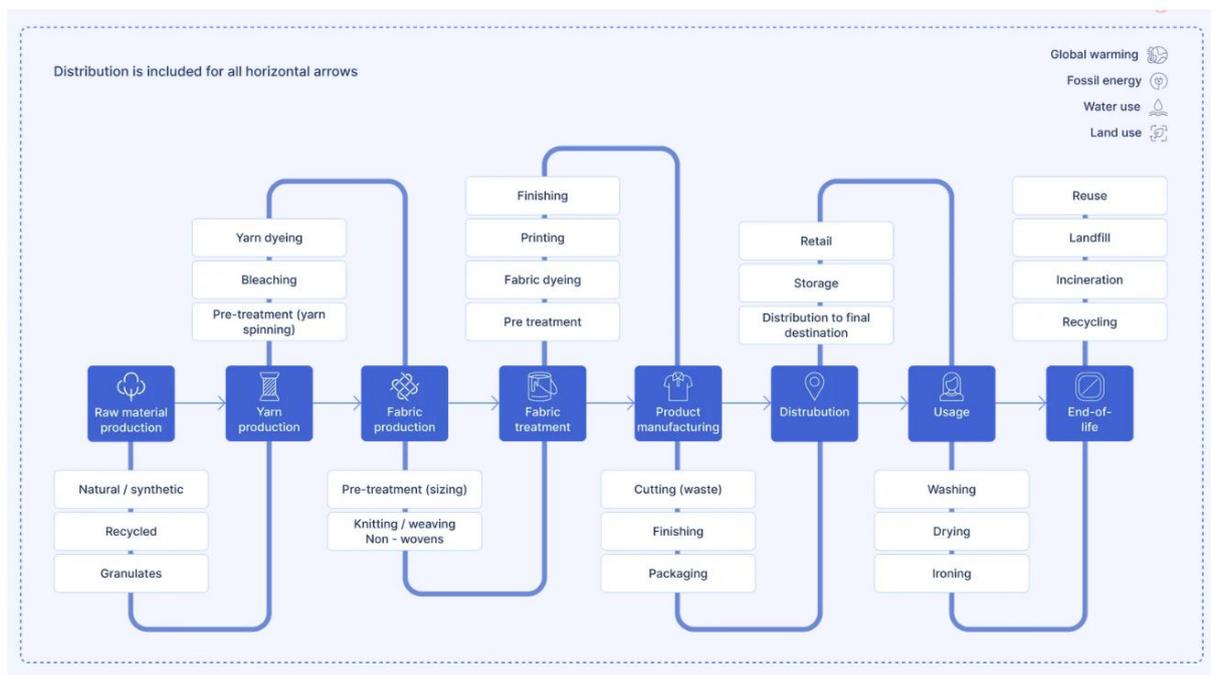


Abbildung 42: Modellgrundlage von „bAwear“ zur ökologischen Impactberechnung inkl. Industriegewaschleasing (Usage) und Recycling (Quelle: <https://bawear-score.com/methodology/>).

Der *bAwear Advanced Impact Calculator* wird von SimaPro unterstützt und nutzt die mid-point ReCiPe 2016 Methode. Die Methodologie deckt alle Schritte in der textilen Lieferkette ab (Cradle-to-Gate und -Grave) und ist auf die bevorstehende EU-Gesetzgebung vorbereitet.

<sup>14</sup> <https://bawear-score.com/>

## Vorteile der bAwear-Lösung

- **Identifizieren der Impact-Hotspots:** bAware revolutioniert die Transparenz von ökologischen Auswirkungen. Die entscheidenden Impact-Hotspots können schneller und einfacher identifiziert werden.



Abbildung 43: Beispieldarstellung eines Umweltauswirkungs-Berichts nach „bAware“ (Quelle: Präsentation für CIBUTEX).

- **Benutzerfreundlichkeit:** Die fortschrittlichen Berechnungen sind rund um die Uhr verfügbar. Dies gewährleistet eine benutzerfreundliche Anwendung und präzise Ergebnisse.
- **Schnelle und Skalierbarkeit:** Durch die Verwendung einer einheitlichen Methodologie stellen wir sicher, dass die Ergebnisse vergleichbar sind. Dies ermöglicht schnelle und skalierbare Berechnungen, die den Bedürfnissen von Unternehmen jeder Größe gerecht werden.
- **Automatisierung:** Mit bAware können Sie automatisch hunderte oder tausende von Produkten berechnen, dank der Funktionalität für Batch-Uploads und der API-Integration. Dies spart Zeit und minimiert den manuellen Aufwand.

Durch diese Vorteile bietet bAware eine umfassende und effiziente Lösung zur Berechnung und Analyse der ökologischen Auswirkungen in der Textilindustrie.

## Nachteile der bAwear-Lösung

- **Initiale Implementierungskosten:** Die Einführung und Integration von bAware kann mit hohen anfänglichen Kosten verbunden sein, insbesondere für kleinere Unternehmen mit begrenzten Ressourcen.
- **Abhängigkeit von Datenqualität:** Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Impactberechnungen hängen stark von der Qualität und Verfügbarkeit der eingehenden Daten ab. Unvollständige oder fehlerhafte Daten können die Ergebnisse verfälschen.

- **Komplexität der Software:** Trotz der Benutzerfreundlichkeit kann die Nutzung der fortschrittlichen Funktionen und das Verständnis der Methodologien (wie SimaPro und ReCiPe 2016) eine Lernkurve für neue Benutzer darstellen.
- **Erforderliche IT-Infrastruktur:** Die Automatisierung und Skalierbarkeit erfordern eine robuste IT-Infrastruktur. Unternehmen müssen sicherstellen, dass ihre Systeme kompatibel sind und möglicherweise zusätzliche Investitionen in ihre IT-Landschaft tätigen.
- **Kontinuierliche Datenpflege:** Um genaue und aktuelle Impactberechnungen zu gewährleisten, ist eine kontinuierliche Datenpflege notwendig. Dies erfordert personelle Ressourcen und kann im laufenden Betrieb zusätzlichen Aufwand bedeuten.
- **Datenschutz und Sicherheit:** Die Verwaltung großer Mengen sensibler Daten über Produkte und Lieferketten erfordert strenge Datenschutz- und Sicherheitsmaßnahmen. Ein Verstoß gegen diese Maßnahmen könnte erhebliche Risiken und rechtliche Konsequenzen nach sich ziehen.
- **Begrenzte Anpassungsfähigkeit:** Obwohl bAwear eine umfassende Lösung bietet, kann es Herausforderungen bei der Anpassung an sehr spezifische oder einzigartige Unternehmensanforderungen geben. Allerdings bietet bAwear auch einen „Expert-Modus“ an, der gezielt unternehmensspezifische Daten berücksichtigen kann. Die in diesem Modus erstellten Ergebnisse sind auditfähig und können für Prüfungen durch Drittzertifizierer wie *Bureau Veritas* vorbereitet werden. Dies erleichtert den Zertifizierungsprozess und stellt sicher, dass die Umweltbewertung den höchsten Standards entspricht.
- **Abhängigkeit von Drittanbietern:** Die Lösung stützt sich auf die Software von Drittanbietern (wie SimaPro), was zu Abhängigkeiten führen kann. Änderungen oder Updates seitens der Drittanbieter könnten Auswirkungen auf die Nutzung und Leistung von bAware haben.

### Fazit zu bAwear

bAwear bietet eine umfassende Lösung für Unternehmen, die ihre Umweltwirkungen präzise messen und steuern möchten. Durch die Kombination von Benutzerfreundlichkeit, automatisierten Prozessen und der Möglichkeit zur Anpassung an spezifische Anforderungen stellt bAwear sicher, dass Unternehmen gut gerüstet sind, um den wachsenden Anforderungen an Nachhaltigkeit und Transparenz gerecht zu werden. Diese Lösung unterstützt nicht nur die Einhaltung zukünftiger gesetzlicher Vorgaben, sondern hilft auch dabei, nachhaltige Geschäftspraktiken langfristig zu etablieren. Mit seinen fortschrittlichen Funktionen wie dem „Expert-Modus“ ermöglicht es bAwear zudem, detaillierte Einblicke in die gesamte Lieferkette zu gewinnen und fundierte Entscheidungen zur Verbesserung der ökologischen Bilanz zu treffen.

## **Analyse von Cirmar als umfassendes Lösungstool**

**Cirmar**<sup>15</sup> ist darauf spezialisiert, Unternehmen bei der Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien zu unterstützen. Es bietet Werkzeuge und Plattformen für die Verfolgung, Analyse und Optimierung von Materialflüssen und Ressourcen in verschiedenen Branchen. Cirmar legt dabei einen stärkeren Fokus auf die Zirkularität und die Wiederverwendung von Materialien, was es besonders für Unternehmen relevant macht, die ihre Prozesse auf eine nachhaltige und kreislaforientierte Wirtschaft umstellen möchten. Cirmar kombiniert die beiden Gesichtspunkte Transparenz in der Lieferkette und Berechnung des ökologischen Impacts und liefert dazu einen digitalen Produktpass:

### **1. Lieferkettentransparenz**

Cirmar bietet mit dem C\_passport® einen digitalen Produktpass, der detaillierte Informationen zur Produktstruktur, Montage und Weiterverwendung liefert. Dieser Pass ermöglicht es Unternehmen, ihre Lieferketten transparent darzustellen und Rückverfolgbarkeit sicherzustellen. Durch die Einbindung von Anweisungen zur Rückführungslogistik und Recycling wird die Zirkularität gefördert.

### **2. Impactberechnung**

Cirmar berechnet automatisch die ökologischen Auswirkungen entlang der Lieferkette und erfüllt dabei internationale Standards wie ISO 14000 und EN 15804. Die Ergebnisse werden durch das C\_dashboard® visualisiert, das einen Überblick über Materialien, Auswirkungen und CO<sub>2</sub>-Preise bietet. Dies ermöglicht es, die Wirkung der zirkulären Prozesse zu quantifizieren und zu kommunizieren.

Im Folgenden zeigen Abbildung 44 und Abbildung 45 am Beispielartikel „E-bike“ den von Cirmar generierten Output bzw. Bericht zum Produkt und dessen Umweltauswirkungen.

---

<sup>15</sup> <https://cirmar.com/de/>

**E-bike** End product

A circular e-bike that can be endlessly refurbished. Adapt the bike to your needs and change parts when necessary.

[Visit product website](https://cirmar.com)

<b>Defined use period (years)</b> 10	<b>Dominant material group(s)</b> Metals, Plastics, Minerals	<b>Next use application</b> 60% refurbished in new e-bike, 40% recycled - various applications	
<b>End of use treatment</b> 4.38% Incineration, 7.31% Refurbishment, 88.31% Recycling	<b>Weight</b> 16,42 Kilogram	<b>Quantity</b> 1 Items	<b>MSDS</b> yes

**Interested in your own C\_passport®?** Go to [cirmar.com](https://cirmar.com) and learn all about product passports.

**Download QR-code**  
Copy public C\_passport® link

**UN Sustainable development goals**

**Materials** | Impact | Encodings | Extra information

- Metals 88.04%
- Plastics 7.08%
- Minerals 4.88%

Abbildung 44: Informationen zum Beispielprodukt „E-bike“ in der Cirmar-Plattform (Quelle: Präsentation für CIBUTEX).

**Materials** | **Impact** | Encodings | Extra information

Number: 1

<b>CO<sub>2</sub> impact</b>  45.56 Kilogram	<b>Energy impact</b>  205.21 kWh	<b>H<sub>2</sub>O impact</b>  358.17 Litre
<b>Raw materials saved</b>  12.58 Kilogram	<b>CO<sub>2</sub> price</b>  3.25 EUR	<b>SROI impact</b>  00:40 h

Cimmar impact values are derived from ISO 14000 compliant international databases, projected by Cimmar at an LCA+ scope (more info [here](#)). Cimmar can't take responsibility for the accuracy of both the object's material and weight composition.

Abbildung 45: Daten zu den Umweltauswirkungen des Beispielprodukts „E-bike“ in der Cirmar-Plattform (Quelle: Präsentation für CIBUTEX).

### 3. Digitaler Produktpass

Der C\_passport® integriert alle relevanten Daten, um den Wert und die Qualität der Materialien zu bewahren. Er berücksichtigt sowohl den Ursprung als auch die Zukunft der Produkte und ermöglicht es, gesetzliche Anforderungen zu erfüllen und zirkuläre Ambitionen zu verwirklichen.

### Vorteile von Cirmar

- **Internationale Standards:** Erfüllung von ISO- und EU-Vorgaben.
- **Automatisierte Impactberechnung:** Integrierte Berechnung von Umweltauswirkungen.
- **Zirkularität:** Fokus auf Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit.
- **Kundentransparenz:** Visualisierung der Daten zur Überzeugung von Kunden.

### Nachteile von Cirmar

- **Komplexität:** Die Implementierung erfordert möglicherweise umfassende Anpassungen und Schulungen.
- **Kosten:** Initiale und laufende Kosten könnten für kleinere Unternehmen eine Herausforderung darstellen.
- **Datenabhängigkeit:** Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt stark von der Qualität der eingehenden Daten ab.

Die Zusammenführung der verschiedenen Softwaresysteme ist noch im Gange und wird voraussichtlich noch einige Zeit in Anspruch nehmen. Eventuell kommen noch Programmierungskosten hinzu, das ist final noch nicht diskutiert. Dabei gilt es, die textilspezifischen Vorteile jedes Systems zu nutzen (wie z. B. die breite Datengrundlage zur textilen Kette für die Impactberechnung bei bAwear) und miteinander zu kombinieren.

#### 4.5.9 *Aufbau der digitalen Plattform CIBUTEXCHANGE*

Um eine effiziente und transparente Kreislaufwirtschaft zu gewährleisten, ist die präzise Erfassung von recycelbaren Waren und die automatische Erstellung von TCs von zentraler Bedeutung. Diese Maßnahmen, unterstützt durch RFID-Technologie und digitale Produktpässe, ermöglichen eine lückenlose Rückverfolgbarkeit des gesamten Recyclingprozesses, vom ersten Erfassungsschritt bis zur finalen Verarbeitung.

Um die Erfassung und Rückverfolgbarkeit von recycelbaren Textilien zu optimieren, wurde die digitale Plattform **CIBUTEXCHANGE** entwickelt. Diese Plattform ist am 1. September 2024 in den Vollbetrieb gegangen und ermöglicht eine nahtlose Integration von RFID-Technologie und automatisierten TCs. Dadurch werden sämtliche Schritte im Recyclingprozess transparent und effizient abgebildet, was die Rückverfolgbarkeit und die nachhaltige Nutzung von Materialien erheblich verbessert. Diese Plattform soll in Zukunft als Anlaufstelle und Überbau fungieren, um dann mit den weiteren teils kostenpflichtigen Tools wie der ökologischen Impactberechnung und der digitalen Produktpasserstellung kombiniert und gekoppelt zu werden.

Die **Erfassung der zu recycelnden Waren** beginnt mit der Identifikation und Kategorisierung der Alttextilien. Hierbei können RFID-Tags oder digitale Produktpässe eingesetzt werden, die

bereits beim Herstellungsprozess integriert wurden. Diese ermöglichen eine präzise Erfassung von Materialzusammensetzungen, Produktionsdetails und früheren Nutzungen.

Die **automatisierten TCs** werden generiert, sobald die Textilien für den Recyclingprozess vorbereitet werden. Diese Zertifikate enthalten alle relevanten Informationen zur Herkunft, Zusammensetzung und dem bisherigen Lebenszyklus des Produkts. Der Prozess ist digital und ermöglicht eine nahtlose Integration in bestehende Datenbanken und Plattformen.

Durch die Nutzung von RFID und digitalen Produktpässen ist die **Rückverfolgbarkeit des Recyclingprozesses** in jedem Schritt gegeben. Vom Sammeln und Sortieren der Alttextilien bis hin zur Verarbeitung in Recyclinganlagen bleibt die Identität und Historie des Materials erhalten. Dies sichert nicht nur Transparenz, sondern ermöglicht auch eine genaue Berichterstattung und Nachverfolgung der ökologischen Auswirkungen des Recyclingprozesses.

Die Kombination dieser Technologien gewährleistet, dass der Recyclingprozess effizient, transparent und konform mit den Anforderungen der Kreislaufwirtschaft erfolgt.

Im Folgenden ist der Prozessablauf schrittweise dargestellt:

- 1. Inhouse-Sortierung:** Der Textilservicebetrieb (TS) sortiert die Textilien nach den Vorgaben der verschiedenen Recyclingunternehmen.
- 2. Mengenmeldung:** Sobald ausreichende Mengen vorhanden sind, meldet der TS diese über die Plattform CIBUTEXCHANGE an. Zusätzliche Sortierkriterien werden abgefragt und die Mengen pro Kategorie eingetragen (siehe Abbildung 46 bzw. Abbildung 47).
- 3. Recycler-Auswahl:** Der TS wählt das gewünschte Recyclingunternehmen aus und stellt ihm die sortierten Mengen zur Verfügung (siehe Abbildung 48).
- 4. Angebotsannahme:** Der Recycler akzeptiert das Angebot, und der TS bestätigt es. Daraufhin wird eine TC-Nummer (Transaction Certificate) erstellt.
- 5. Transportorganisation:** Die Logistik wird über die Gewichte und Palettenplätze informiert und organisiert den Transport vom TS zum Recycler.
- 6. Wareneingang und Bestätigung:** Nach Erhalt der Ware meldet der Recycler das Gewicht in der Plattform und bestätigt den Erhalt.
- 7. Abschluss und Reporting:** Der Recycler informiert über den Einsatz der recycelten Materialien entsprechend den zuvor vertraglich festgelegten Bedingungen, z. B. mit CIBUTEX.

Abbildung 46: Erfassung recycelbarer Textilien durch die digitale Plattform CIBUTEXCHANGE: Eingabe von Erstinformationen (Quelle: CIBUTEX).

Angebotsmaterial

Abbildung 47: Erfassung recycelbarer Textilien durch die digitale Plattform CIBUTEXCHANGE: Auswahl von Materialdetails (Quelle: CIBUTEX).

**Recycler \***

Wählen Sie aus, bei wem Sie Ihre Materialien recyceln möchten:

<input type="radio"/> ALTEX Textil-Recycling GmbH & Co. KG 	<input type="radio"/> Käufer X 
<input type="radio"/> Käufer Y 	<input type="radio"/> Käufer Z 
<input type="radio"/> Firma A	<input type="radio"/> Cypress-Käufer 
<input type="radio"/> eeden GmbH 	<input type="radio"/> Frankenhuis BV 
<input type="radio"/> Nedlin Industrie 	<input type="radio"/> RecyclerTest 
<input type="radio"/> Testunternehmen 	

ZURÜCK

REZENSION

Abbildung 48: Erfassung recycelbarer Textilien durch die digitale Plattform CIBUTEXCHANGE: Auswahlmöglichkeit von Recyclingunternehmen (Quelle: CIBUTEX).

Da es derzeit keine brancheneinheitliche Vorgabe für die RFID-Kennzeichnung bzw. RFID-Erfassung/Lesung gibt, ist eine genaue Sortierung der Textilien noch nicht möglich. Aus diesem Grund wird im Projekt der Fokus auf die Entwicklung einer Kamera-Erkennungstechnologie gelegt, die mithilfe von KI arbeitet. Diese Technologie soll die Identifikation und Sortierung der Textilien effizienter gestalten und langfristig eine Alternative oder Ergänzung zur RFID-basierenden Erfassung bieten.

#### **4.6 Lebenszyklusanalyse (LCA) zur Evaluation eingesparter Logistikemissionen (AP 6)**

Die Entwicklung eines Konzepts zur tatsächlichen Kreislaufführung im Sinne eines Faser-zu-Faser-Recyclings beinhaltet auch die Erarbeitung einer aus ökonomischer sowie ökologischer Sicht effizienten Transportlogistik zwischen den Textilserviceunternehmen und Recyclingunternehmen. Mit der ökologischen Bilanzierung verschiedener Transportlogistik-Optionen wurde die **ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu)** beauftragt. Hierbei lag der Fokus auf Ermittlung und Vergleich der CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke von vier möglichen Logistikooptionen. Neben der Betrachtung von vier unterschiedlichen Transportmedien (Pappkartons, Großraumsäcke aus Polyethylen (sog. Big Packs), faltbare Palettenboxen aus Polypropylen und gepresste Ballen) wurde zusätzlich zwischen Regional-, Überregional- und Ferntransport differenziert. Die wichtigsten aus der Untersuchung ableitbaren Ergebnisse sind wie folgt:

- Das Gesamtergebnis für den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck wird bei allen untersuchten Logistikooptionen von den Transporten selbst dominiert.
- Die drei Logistikooptionen Pappkartons, Big Packs und Palettenboxen sind aus Klimaschutzsicht als gleichrangig zu bewerten. Dies gilt uneingeschränkt für alle betrachteten Transportdistanzen.
- Die gepressten Ballen als vierte Option erweisen sich dagegen aus Klimaschutzsicht als richtungssicher vorteilhaft im Vergleich zu den drei anderen Transportmedien (hohe LKW-Auslastung zu etwa 80% gegenüber ca. 40% möglich). Dies gilt für alle Transportdistanzen.
- Herstellung und Betrieb der Ballenpresse haben nahezu keinen Einfluss auf das Gesamtergebnis.
- Europaletten sowie der für die Beladung und Entladung der LKW nötige Strom sind bei allen vier Logistikooptionen ebenfalls vernachlässigbar.

Detaillierte Informationen zur gewählten Datengrundlage und Methodik, zu den ermittelten CO<sub>2</sub>-Fußabdruckwerten (Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Tonne transportiertes Alttextil) sowie zu Übertragbarkeit und Relevanz der Ergebnisse und den resultierenden Schlussfolgerungen können dem beigefügten ifeu-Bericht: *CO<sub>2</sub>-Fußabdruck diverser Logistikooptionen beim Textilrecycling* entnommen werden (siehe Kapitel 9 Anlage).

## 5 Fazit und Ausblick des erreichten Entwicklungsstandes

Das Projekt wurde unter Bearbeitung der angesetzten Arbeitspakete erfolgreich abgeschlossen. Dabei wurden industriefertige Lösungen für das Recycling von Textilien zur Überführung in kreislaufwirtschaftliche Geschäftsstrukturen geliefert. Allerdings gibt es zunehmend Schwierigkeiten bei der hochwertigen Verwertung von sortierten Alttextilien. Einige wichtige Unternehmen im Bereich des chemischen Recyclings haben ihre Aktivitäten eingestellt. Aktuell können nur mechanische Recycler große Mengen an Alttextilien verarbeiten.

Der Markt für Textilrecycling steht vor großen Herausforderungen. Die riesigen Mengen an Alttextilien und Probleme beim Verkauf von recycelten Fasern führen zu einem drohenden Zusammenbruch des Marktes. Ohne politische Maßnahmen besteht die Gefahr, dass immer mehr Textilien verbrannt oder auf Mülldeponien entsorgt werden.

Für das Erreichen einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft ist eine erweiterte Herstellerverantwortung (übersetzt für „Extended Producer Responsibility“, kurz EPR) dringend erforderlich. Hersteller, Inverkehrbringer und Händler von Textilien sollten durch Beiträge an den Kosten für die Entsorgung und das Recycling beteiligt werden und so Verantwortung für den gesamten Lebenszyklus ihrer Produkte übernehmen. Vorreiter einer solchen Textil-EPR sind die EU-Länder Frankreich und die Niederlande. In den Niederlanden sind die betroffenen Marktakteure ab dem 1. Januar 2025 verpflichtet, die Vorschriften zur verabschiedeten Textil-EPR einzuhalten und finanziell für die Entsorgung von Textilabfällen verantwortlich zu sein. Dies geschieht z. B. durch Einrichtung individueller Rücknahmesysteme oder Beitritt zu einer Herstellerverantwortungsorganisation (producer responsibility organisation, kurz PRO), welche die Einhaltung der Vorschriften übernimmt (z. B. Übermittlung relevanter Daten zum Textil-Recycling an die zuständige Börde).<sup>16,17</sup>

Es gibt bereits auch weitere positive Entwicklungen. Einige vielversprechende chemische Recyclingverfahren wie der Einsatz von PET-Textil- und Faserabfällen für die Gewinnung von recycelten PET-Fasern (rPET-Fasern) stehen kurz vor der großtechnischen Umsetzung.<sup>18</sup> Diese Unternehmen benötigen jedoch staatliche Unterstützung, um die hohen Investitionskosten für große Anlagen decken zu können.

Im Folgenden sind einige Anregungen für eine weitreichende Realisierung der entwickelten Textilkreislauf-Lösungen gegeben:

- Um den Markt für Textilrecycling zu stabilisieren, sind politische Maßnahmen wie die erweiterte Herstellerverantwortung unerlässlich. Durch staatliche Anreize (wie etwa die Förderung nachhaltig produzierter Textilien mit einer EPR für Textilien) können Unternehmen zum Textilrecycling animiert werden.
- Die Förderung von chemischen Recyclingverfahren ist entscheidend, um große Mengen an Alttextilien hochwertig wieder zu verwerten.

<sup>16</sup> <https://collectiefcirculairtextiel.nl/about-us/>

<sup>17</sup> <https://erp-recycling.org/news-and-events/2025/01/erp-netherlands-epr-textile-operations-begin/>

<sup>18</sup> <https://www.reju.com/reju-polyester>

- Es ist wichtig, neue Absatzmärkte für recycelte Fasern zu erschließen und die Akzeptanz von Recyclingtextilien bei Verbrauchern zu erhöhen.

## 6 Öffentlichkeitsarbeit

Das Projekt und seine Ergebnisse wurden auf verschiedenen Veranstaltungen in Vorträgen präsentiert:

- Esther Rohleder, Michael Korger, Martijn Witteveen, Ralf Hellmann, Maïke Rabe, Possibilities and Limitations of Polycotton Recycling, 37<sup>th</sup> International Cotton Conference, Bremen, 22. März 2024.
- Carsten Ridder, Ralf Hellmann, Jan Lamme, Kreislauffähigkeit durch Kooperationen am Praxisbeispiel, DTV-Forum: Textilrecycling – Alttextilensortierung im Fokus, Recycling Atelier Augsburg, Augsburg, 16. Mai 2024.
- Esther Rohleder, Michael Korger, Barbara Boldrini, Kai Nebel, Martijn Witteveen, Ralf Hellmann, Maïke Rabe, Analysis of polycotton for recyclability, 63<sup>rd</sup> Dornbirn Global Fiber Congress (GFC), Dornbirn (Österreich), 12. September 2024.

Dibella hält über die erstellte Projektwebseite, die Informationen zu dem Projektinhalt, Projektfortschritt und den Projektzielen inkl. Lösungsansätzen beinhaltet, die Interessenten des Textilservice-Marktes und der Textilrecyclingbranche weiter informiert.<sup>19</sup> Aktuelle Informationen und Aktivitäten hinsichtlich Anstrengungen zum Aufbau einer zirkulären Textilwirtschaft werden laufend auf den LinkedIn-Kanälen von CIBUTEX und Dibella bereit gestellt.<sup>20,21</sup>

Dibella wird weiterhin renommierte Messen verschiedener Branchen (Gesundheit, Hotellerie, Wäscherei, Reinigung) als Aussteller besuchen, um möglichen Kunden den zweckmäßigen Einsatz wiederverwendbarer und kreislauffähiger Textilien inkl. möglicher Sortierlösungen zu vermitteln (z. B. die jährlich stattfindenden Circular Textile Days in 's-Hertogenbosch (NL) als Business-Event für Partner auf dem Gebiet der innovativen Kreislaufösungen für Textilien, die medlogistica – Internationaler Kongress und Fachmesse für Logistik und Prozessmanagement im Krankenhaus in Leipzig oder die Weltleitmesse für Textilpflege Texcare International in Frankfurt).

---

<sup>19</sup> <https://www.kickup.eco/>

<sup>20</sup> <https://www.linkedin.com/company/cibutex/posts/>

<sup>21</sup> <https://www.linkedin.com/company/dibella---longlife-textiles/posts/>

## **7 Danksagung**

Unser Dank gilt zunächst der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung dieses Vorhabens. Weiterhin möchten wir dem dänischen Robotikunternehmen Inwatec ApS, zugehörig zur JENSEN-GROUP, insbesondere Martin Sukop, Mads Andresen, Nikolaj Juulsgaard und Jonas Gyrupe Jeppesen für die Unterstützung beim Entwurf und der Bereitstellung des Greif- und Sortierroboters danken.

Abschließend danken wir allen Personen und Mitarbeitenden, die an den Projektuntersuchungen, -analysen und -auswertungen beteiligt waren und dieses Vorhaben mit weiterführenden Ideen und Anregungen produktiv begleitet haben.

## 8 Anhang

**Anhang 1:** Tabelle der Ergebnisse der Fällversuche in Cuoxam-Lösung, Gewichte des PET-Rückstands und der gelösten und wieder gefällten Cellulose im Vergleich zur Gesamtmasse.

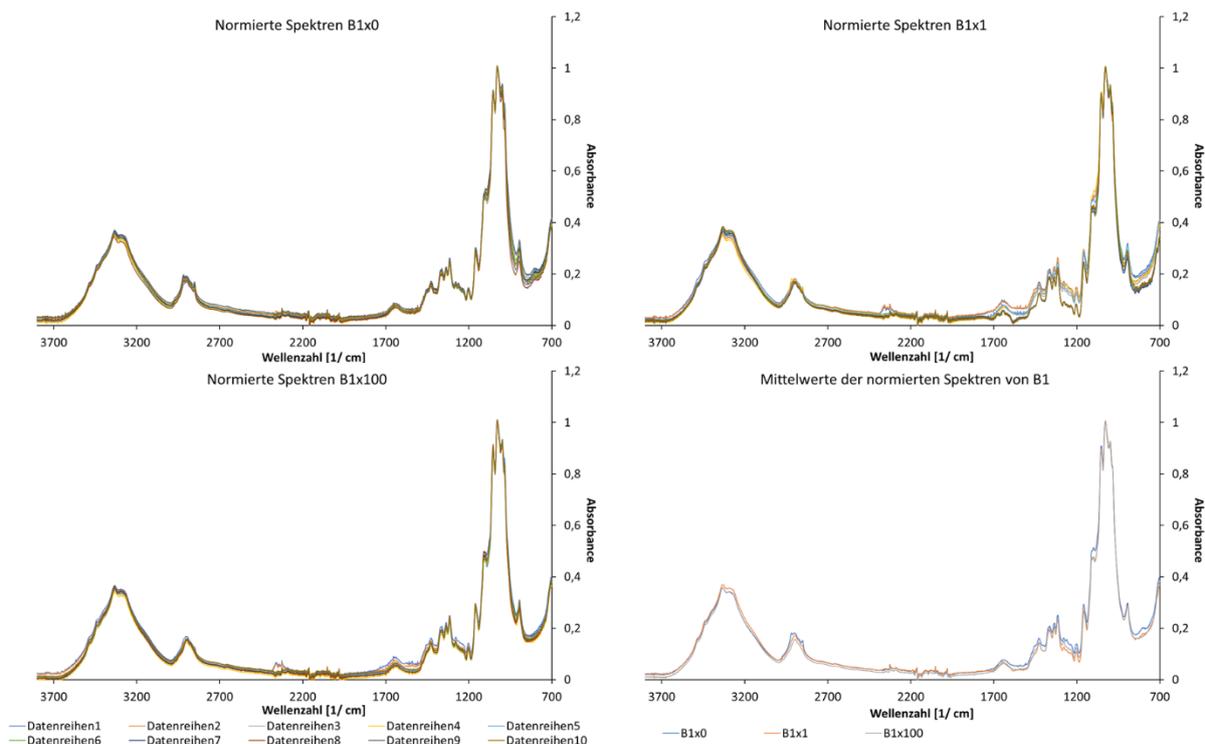
Probe <sup>1</sup>	Lufttrockene Probe [mg]	Erwartetes Gewicht des PET-Rückstands [mg]	Gewicht Cellulose [mg] <sup>2, *</sup>	Gewicht des PET-Rückstands [mg] *	Gesamtgewicht der Rückstände [mg]
<b>B4x1</b>	167,8	83,9	50,5	139,4	189,9
<b>B4x100</b>	146,5	73,25	77,9	76,0	153,9
<b>B7x0</b>	189,4	94,7	105,8	96,5	202,3
<b>B7x30</b>	206,8	103,4	104,5	107,6	212,1
<b>B7x100</b>	200,7	100,35	103,8	103,2	207,0

\* luftgetrocknete Probe

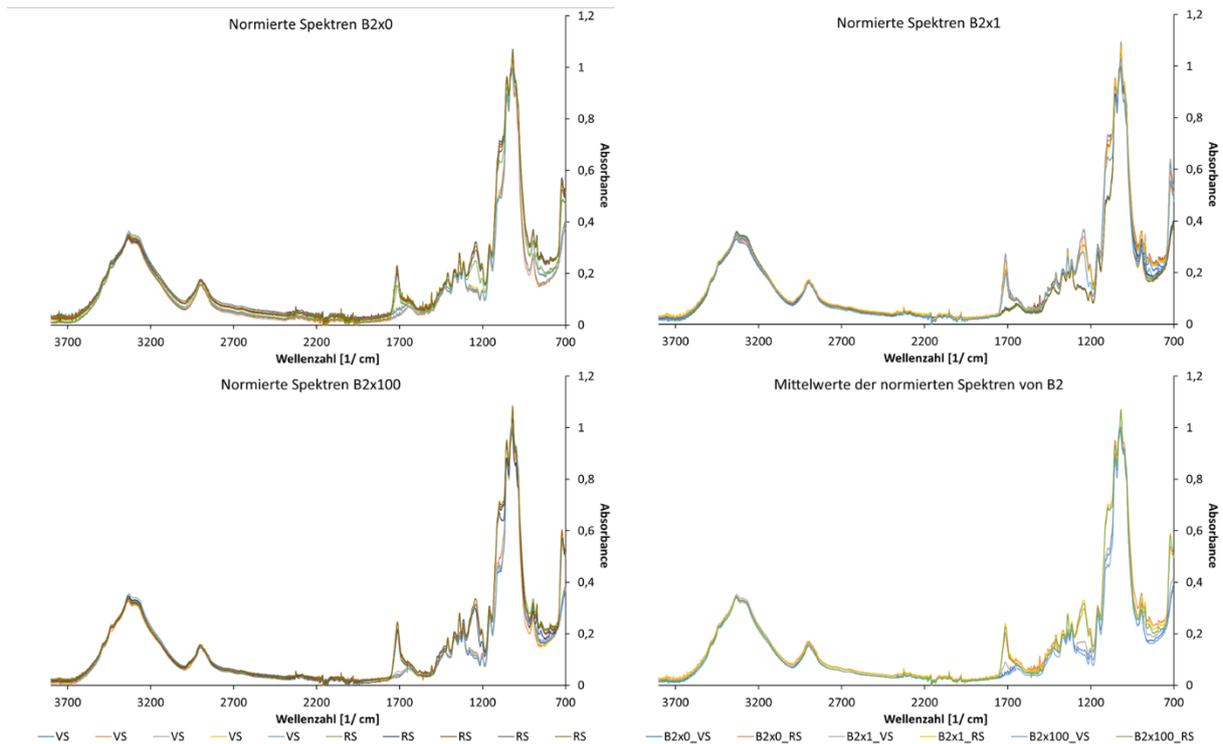
<sup>1</sup> Probe x Zahl der Waschgänge

<sup>2</sup> aus der Cuoxam-Lösung gefällter und abfiltrierter Baumwoll- oder Lyocell-Anteil

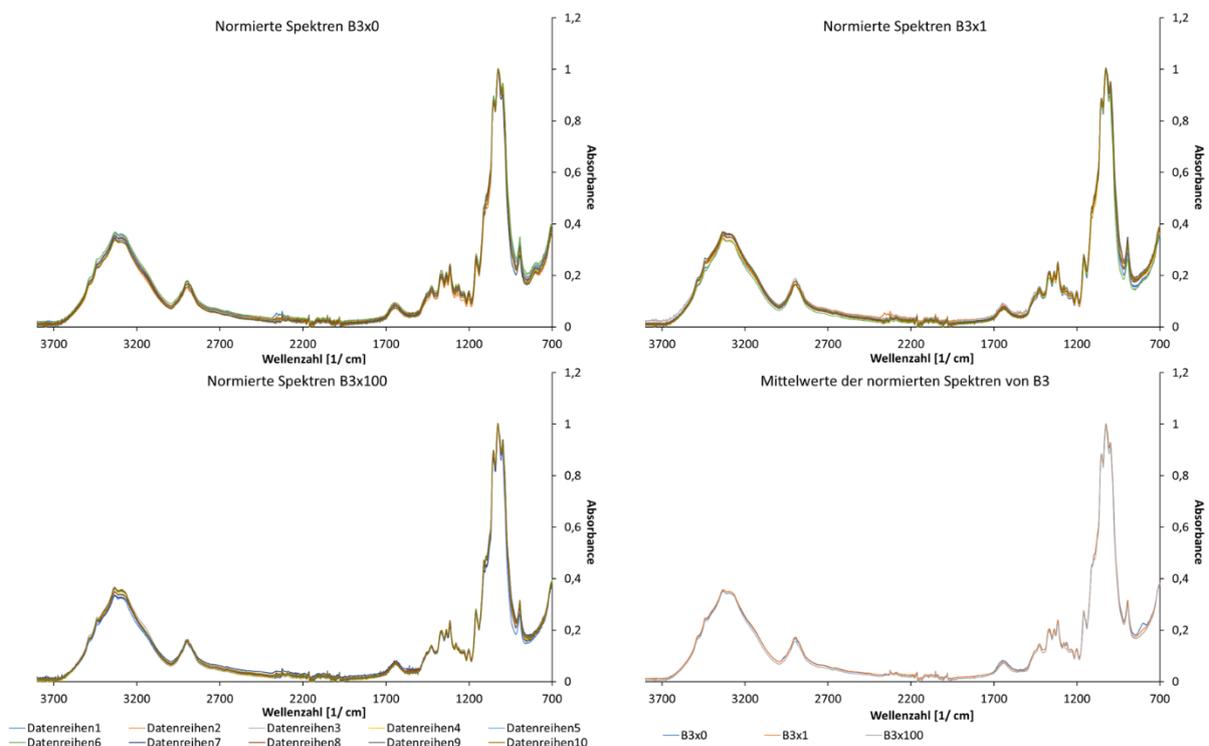
**Anhang 2:** Normierte FTIR-Spektren und Vergleich der Mittelwerte der untersuchten Textilproben (Abbildungen A 1 bis A 7).



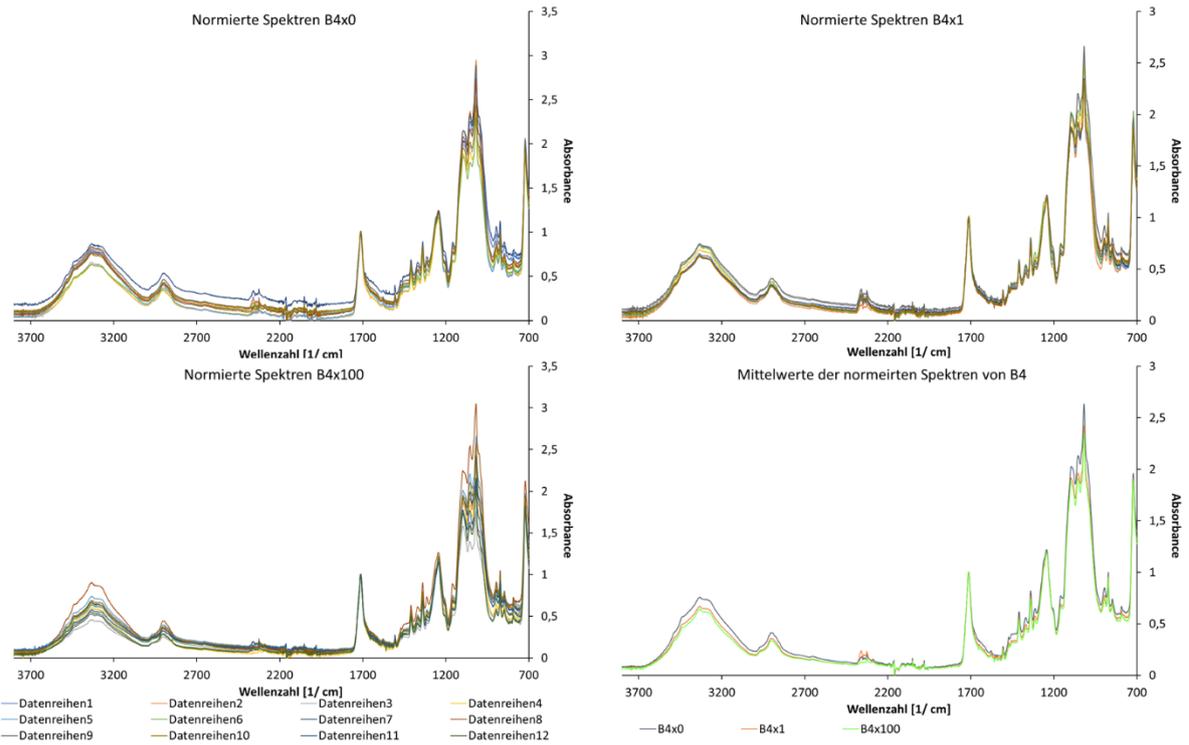
**A 1:** Normierte FTIR-Spektren und Vergleich der Mittelwerte von Probe B1 (ungewaschen B1x0, einmal gewaschen B1x1 und 100-mal gewaschen B1x100).



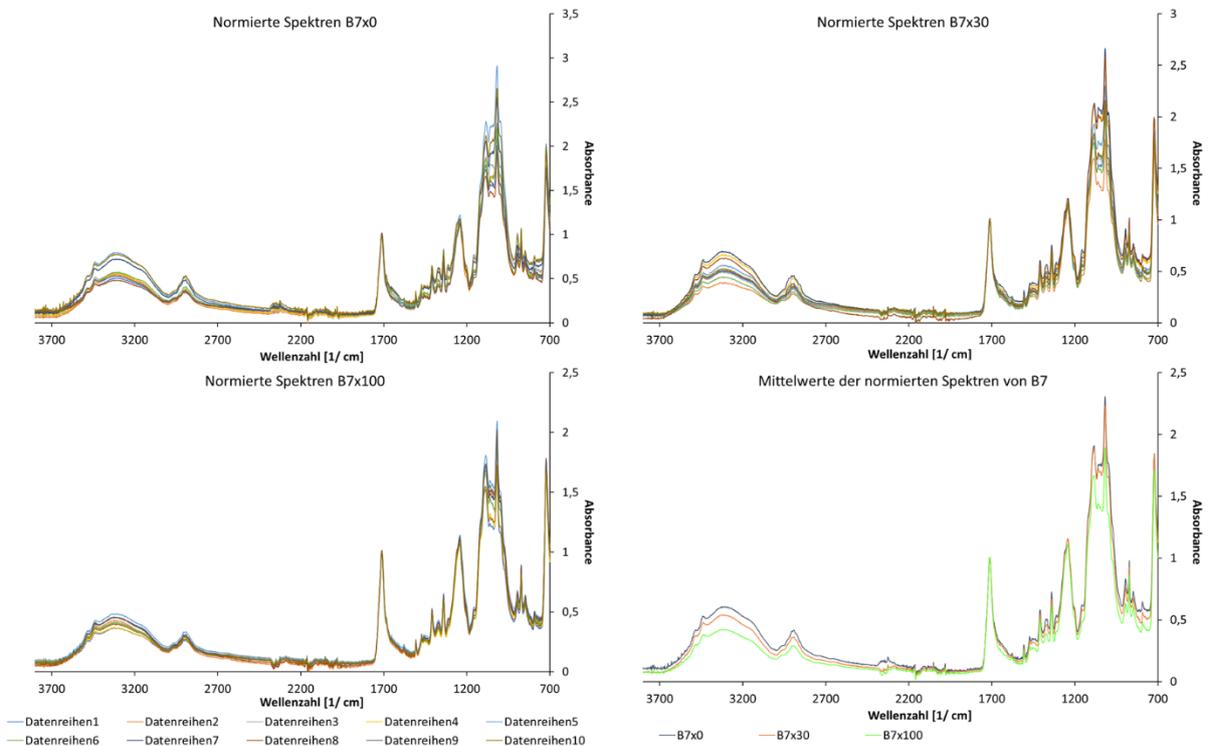
**A 2:** Normierte FTIR-Spektren und Vergleich der Mittelwerte von Probe B2 (ungewaschen B2x0, einmal gewaschen B2x1 und 100-mal gewaschen B2x100); VS = Vorderseite, RS = Rückseite.



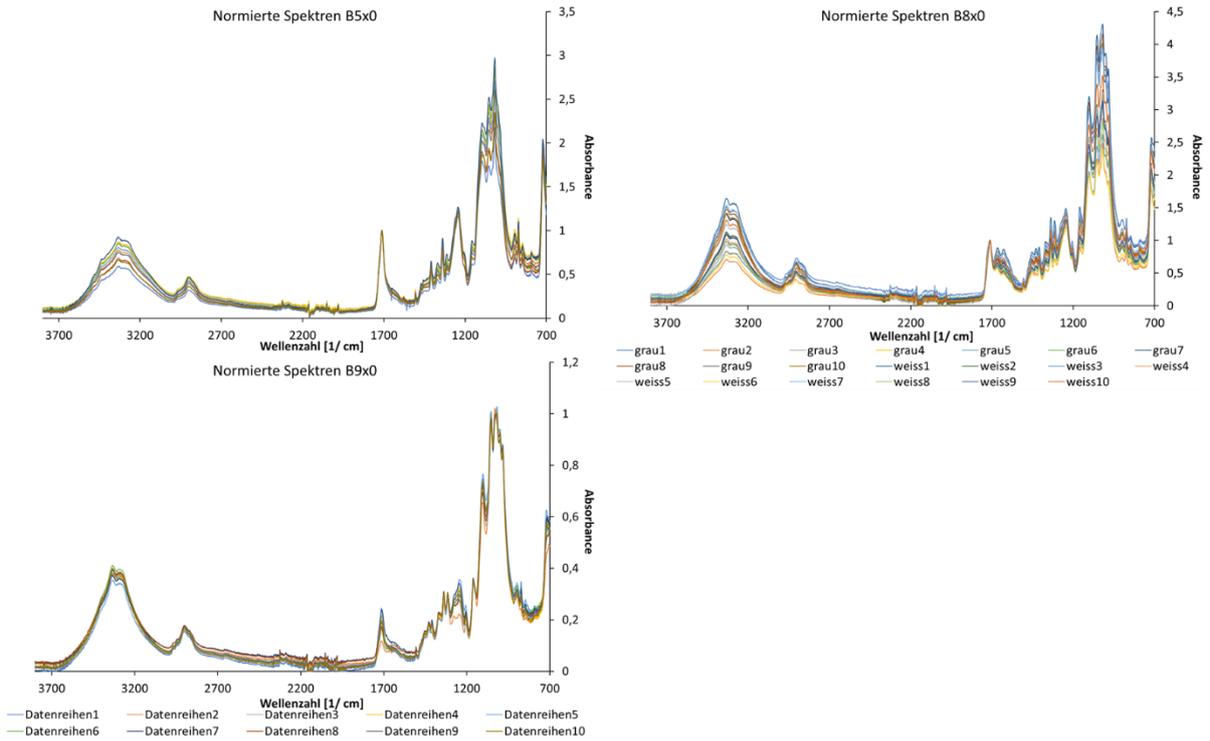
**A 3:** Normierte FTIR-Spektren und Vergleich der Mittelwerte von Probe B3 (ungewaschen B3x0, einmal gewaschen B3x1 und 100-mal gewaschen B3x100).



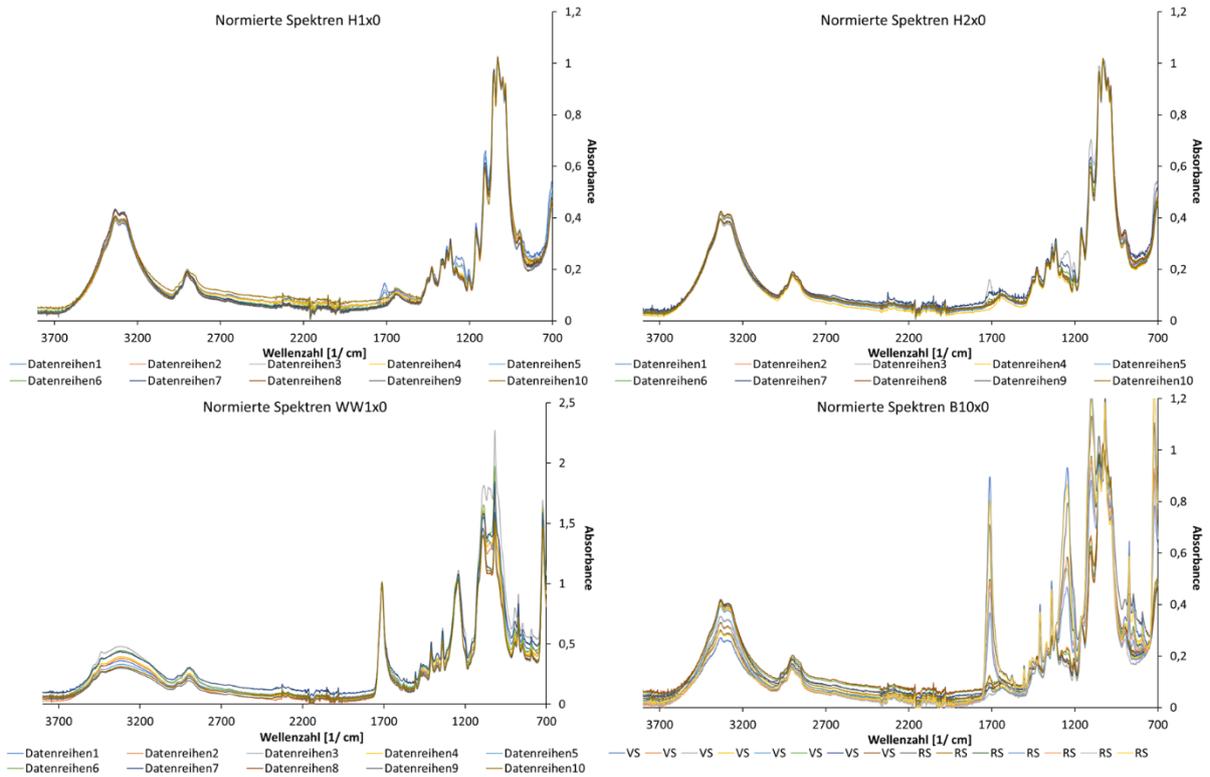
**A 4:** Normierte FTIR-Spektren und Vergleich der Mittelwerte von Probe B4 (ungewaschen B4x0, einmal gewaschen B4x1 und 100-mal gewaschen B4x100).



**A 5:** Normierte FTIR-Spektren und Vergleich der Mittelwerte von Probe B7 (ungewaschen B7x0, 30-mal gewaschen B7x30 und 100-mal gewaschen B7x100).



**A 6:** Normierte FTIR-Spektren der Proben B5, B8 und B9 (alle ungewaschen); B8: je 10 Spektren des grauen und des weißen Teils.



**A 7:** Normierte FTIR-Spektren der Proben HH1, HH2, B10 und WW1 (alle ungewaschen); Probe B10: VS = Vorderseite, RS = Rückseite.

## **9 Anlage (ifeu-Bericht)**

Bericht „CO<sub>2</sub>-Fußabdruck diverser Logistikooptionen beim Textilrecycling“ der ifeu gGmbH

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)



INSTITUT FÜR ENERGIE-  
UND UMWELTFORSCHUNG  
HEIDELBERG

# CO<sub>2</sub>-Fußabdruck diverser Logistikooptionen beim Textilrecycling

Maximilian Breyer, Guido Reinhardt

Heidelberg, 2024



## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Hintergrund</b>	<b>3</b>
<b>2 Ziel</b>	<b>3</b>
<b>3 Systembeschreibung</b>	<b>3</b>
<b>4 Methodik und Basisdaten</b>	<b>4</b>
4.1 Systemgrenzen	4
4.2 CO <sub>2</sub> -Fußabdruck	4
4.3 Basisdaten	5
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>6</b>
5.1 Einführung zur Ergebnisdarstellung	6
5.2 Vergleich der Logistikooptionen bei kurzer Transportdistanz	7
5.3 Vergleich der Logistikooptionen bei mittlerer Transportdistanz	8
5.4 Vergleich der Logistikooptionen bei langer Transportdistanz	9
5.5 Zusammenführung der Ergebnisse	10
<b>6 Anwendbarkeit, Übertragbarkeit und Relevanz</b>	<b>11</b>
<b>7 Schlussfolgerungen</b>	<b>12</b>
<b>8 Literatur</b>	<b>13</b>

### Bildnachweis:

Titelseite (von links nach rechts): 1) © assetseller - stock.adobe.com 2) © Pixel-Shot - stock.adobe.com 3) © Jenny Sturm - stock.adobe.com

### Danksagung:

Wir bedanken uns herzlich bei Herrn Ralf Hellmann, Dibella GmbH, für die äußerst kooperative Betreuung des Projektes. Außerdem danken wir ihm sowie Frau Justine Szwedek, Coöperative CIBUTEX U.A., für die kompetente fachliche Begleitung einschließlich der Bereitstellung von spezifischen Informationen und Daten zur Logistik sowie der steten Ansprechbarkeit während der Projektlaufzeit. Auch danken wir Herrn Carsten Ridder, Dibella GmbH, der die Weitsicht hatte, dieses wichtige Projekt auf den Weg zu bringen. Zudem wollen wir uns bei unserem Kollegen Nils Rettenmaier bedanken, der in allen Phasen des Projektes als Ideengeber und Reviewpartner wertvoll zum Gelingen der Studie beigetragen hat.

## 1 Hintergrund

---

Alttextilien im gewerblichen Business-to-Business (B2B)-Bereich werden aus Umweltschutzsicht bislang nur unzureichend verwertet. Entweder erfahren sie am Ende des Gebrauchs in Downcycling-Prozessen eine qualitative Abwertung oder sie werden thermisch verwertet. Recycling im Sinne eines echten Kreislaufsystems kann hier einen Beitrag zur Reduzierung der Umweltauswirkungen in der B2B-Textilbranche liefern.

Das durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderte Projekt „Aufbau KI-gestützter geschlossener Kreisläufe für B2B-Textilien aus Baumwoll-Polyester-Mischungen auf der Basis chemischen Upcyclings“ strebt daher eine Optimierung der Stoffströme zwischen dem Lebensende des Textils und seinem Recycling an. Dabei soll sowohl ein Detektier- und Sortiersystem für Alttextilien als auch ein Konzept zur tatsächlichen Kreislaufführung im Sinne eines Faser-zu-Faser-Recyclings entwickelt werden. Letzteres beinhaltet auch die Erarbeitung einer aus ökonomischer sowie ökologischer Sicht effizienten Transportlogistik zwischen den Textilserviceunternehmen und Recyclingunternehmen.

Mit der ökologischen Bilanzierung verschiedener Transportlogistik-Optionen wurde das ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu) von der Dibella GmbH, der Initiatorin des oben aufgeführten Vorhabens, beauftragt. Hierbei liegt der Fokus auf dem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von vier möglichen Logistikooptionen.

## 2 Ziel

---

Das Ziel der Studie ist es, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von vier Logistikooptionen zum Transport von Alttextilien von einem Textilserviceunternehmen zu einem Recyclingunternehmen zu ermitteln und zu vergleichen. Hierfür sollen vier unterschiedliche Transportmedien betrachtet werden: Pappkartons, Big Packs, Palettenboxen aus Kunststoff und gepresste Ballen. Zusätzlich soll zwischen Regional-, Überregional- und Ferntransport differenziert werden.

## 3 Systembeschreibung

---

Gemäß der Zielsetzung wird der Transport von Alttextilien vom Textilserviceunternehmen zum Recyclingunternehmen betrachtet. Die Alttextilien werden im Textilserviceunternehmen abhängig vom jeweiligen Transportmedium auf unterschiedliche Weise verpackt, mit Gabelstaplern auf LKW verladen und zum Recyclingunternehmen transportiert. Hierzu wurde in Abstimmung mit der Dibella GmbH festgelegt, dass die Transporte durch beauftragte Speditionsunternehmen abgewickelt werden.

Folgende Transportmedien werden verglichen.

- **Pappkartons:** Große, wiederverwendbare Kartons aus Wellpappe. Der Transport erfolgt auf Europaletten.
- **Big Packs:** Großraumsäcke aus Polyethylen. Der Transport erfolgt auf Europaletten.
- **Palettenboxen:** Große, wiederverwendbare und faltbare Behälter aus Polypropylen mit integrierten Paletten.
- **Gepresste Ballen:** Die Alttextilien werden im Textilserviceunternehmen mit einer elektrischen Ballenpresse komprimiert und mit je 1-2 Bändern aus Polyethylen zusammengehalten. Der Transport der Ballen erfolgt auf Europaletten.

Spezifische Details zu den Transportmedien wie Füllmenge, Umlaufzahl der wiederverwendbaren Transportmedien, Gewicht etc. sind in Abschnitt 4.3 „Basisdaten“ im Einzelnen aufgeführt. Wiederverwendbare Transportmedien werden per LKW zum Textilserviceunternehmen zurücktransportiert. Ist die Lebensdauer der Transportmedien erreicht, werden diese stofflich recycelt bzw. in Müllverbrennungsanlagen einer thermischen Verwertung zugeführt.

Da alle LKW-Transporte im betrachteten Systemvergleich von Speditionsunternehmen durchgeführt werden, sind auch alle mittelbar mit dem Transport der Alttextilien verbundenen LKW-Fahrten zu berücksichtigen. Dazu gehören die jeweilige An- und Abfahrt der LKW, die Rückführung der wiederverwendbaren Transportmedien zum Textilserviceunternehmen sowie die Logistik für die Anlieferung und Abholung bzw. Rückführung der Europaletten.

Da der mit dem LKW-Transport verbundene Kraftstoffverbrauch erfahrungsgemäß einen deutlichen Anteil an den ökologischen Gesamtlasten von Logistiksystemen ausmachen kann, werden drei Szenarien (Regional-, Überregional- und Ferntransport) wie folgt definiert:

- **Kurze Transportdistanz:** 150 km
- **Mittlere Transportdistanz:** 500 km
- **Lange Transportdistanz:** 1.000 km

Entsprechend der Zielsetzung sind sämtliche dem Textilserviceunternehmen vorgelagerte und dem Recyclingunternehmen nachgelagerte Bereiche der textilen Ware bzw. der Alttextilien nicht Bestandteil dieser Untersuchung.

## 4 Methodik und Basisdaten

---

Im Rahmen der Studie wird das Methodeninstrument der Ökobilanz eingesetzt. Zu deren Durchführung ist eine Reihe von Festlegungen notwendig, von denen die wichtigsten in den folgenden Abschnitten detailliert aufgeführt sind.

### 4.1 Systemgrenzen

Die Erstellung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks erfolgt in Anlehnung an die ISO-Normen 14040 und 14044 zur Produkt-Ökobilanz [ISO 2021a; b]. Entsprechend dieser Normen werden die Umweltauswirkungen aller ein- und ausgehenden Stoff- und Energieströme entlang der betrachteten Prozesskette, im Regelfall von der Wiege bis zur Bahre, abgebildet.

Bei der hier analysierten Fragestellung wurde folglich der gesamte Lebensweg der Transportmedien von der Produktion der (zur Herstellung der Transportmedien) benötigten Materialien, über die Nutzungsphase (Transport der Alttextilien) bis hin zur Entsorgung bzw. Wiederverwertung der Materialien berücksichtigt. Die wesentlichen spezifischen Festlegungen sind in Kapitel 3 beschrieben.

### 4.2 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck

Während die Produkt-Ökobilanz nach den internationalen Normen ISO 14040 und 14044 eine Reihe von Umwelt-Wirkungskategorien einbezieht wie Eutrophierung, Versauerung, Ressourcennutzung und einige mehr,

fokussiert sich diese Studie ausschließlich auf die Wirkungskategorie Klimawandel, auch als Carbon Footprint oder CO<sub>2</sub>-Fußabdruck bezeichnet. Dieser wurde in Anlehnung an ISO 14067 zum Carbon Footprint von Produkten ermittelt [ISO 2019]. Dabei werden sämtliche Treibhausgasemissionen berücksichtigt – darunter neben Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) insbesondere auch Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) – und mittels Umrechnungsfaktoren auf CO<sub>2</sub>-Äquivalente bezogen [IPCC 2021].

### 4.3 Basisdaten

Die spezifischen Daten und Informationen zur Bilanzierung der Transportmedien wurden von der Dibella GmbH zur Verfügung gestellt und vom ifeu auf Plausibilität überprüft. Einige Prozessdaten und Festlegungen, die in den zur Verfügung gestellten Daten und Informationen nicht enthalten waren, wurden durch das ifeu ergänzt [ifeu 2024] bzw. abgeleitet. Dazu gehören beispielsweise die Distanz und Leistungen für die Transporte, die neben dem Haupttransport der Alttextilien notwendig sind (wie die Anfahrt der LKW vom Speditionsunternehmen, den Rücktransport der Transportmedien und der Europaletten sowie die anschließende Rückfahrt der LKW zum Speditionsunternehmen), oder auch Kennzahlen zu den Europaletten (Umlaufzahl, Recyclingquote etc.). Hierfür wurden für Deutschland markttypische Werte abgeleitet. In Tabelle 1 sind auszugsweise die wichtigsten Basisdaten aufgeführt, die zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Logistikooptionen herangezogen wurden.

Tabelle 1: Ausgewählte Basisdaten zur Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks vier verschiedener Transportmedien.

	Einheit	Pappkartons	Big Packs	Palettenboxen	Gepresste Ballen
Gewicht pro Transportmedium	kg	6,4	3	25	-
Füllmenge Textil pro Transportmedium	kg	93,6	300	150	300
Lebensdauer des Transportmediums	Transportzyklen	5	50	100	-
Beladung eines 40-t-LKW bei Fahrt zum Recyclinghof	Transportmedien	99	25	66	66
Transportmedien pro Europalette	Stk.	3	1	-	2
Lebensdauer der Europaletten	Transportzyklen	25	25	-	25
Gewicht einer Europalette	kg	22	22	-	22
Gewicht der Ballenpresse	kg	-	-	-	1.000
Gewicht der Kunststoffbänder pro Ballen	kg	-	-	-	0,5
Leistung der Ballenpresse beim Pressen	kW	-	-	-	3
Zeitaufwand pro gepresstem Ballen	min	-	-	-	10
Lebensdauer der Ballenpresse	a	-	-	-	20
Gepresste Ballen pro Wochentag	Stk.	-	-	-	2
Kurze Transportdistanz	km		150		
Mittlere Transportdistanz	km		500		
Lange Transportdistanz	km		1.000		

Darüber hinaus sind für die Bilanzierung eine Reihe weiterer Basisdaten nötig, unter anderem die Umweltlasten („Vorketten“) der eingesetzten Materialien und Energieträger. Die hierfür nötigen Daten wurden aus den jeweils geeigneten Datenbanken wie der ecoinvent-Datenbank [Ecoinvent lfd.] oder der Datenbank des ifeu-Instituts [ifeu 2024] entnommen bzw. für die Erfordernisse des Projektes vom ifeu abgeleitet.

## 5 Ergebnisse

---

### 5.1 Einführung zur Ergebnisdarstellung

In diesem Abschnitt werden die CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke der verglichenen Logistikooptionen pro Tonne transportiertes Alttextil dargestellt. Dabei wird nach den folgenden Kategorien differenziert.

- **Material der Transportmedien:** Dies entspricht der Produktion der in Kapitel 3 definierten Materialien.
- **Material der Ballenpresse:** Die Ballenpresse wird über viele Jahre hinweg eingesetzt. Die bei der Produktion der Presse entstehenden Emissionen werden folglich über die komplette Betriebszeit der Presse und damit über alle Pressvorgänge während der Betriebszeit abgeschrieben.
- **Bänder für Ballen:** Kunststoffbänder aus Polyethylen, die zur Stabilisierung um die gepressten Ballen gewickelt und nach einmaliger Verwendung thermisch verwertet werden.
- **Europalette:** Die vorwiegend aus Holz bestehenden Paletten, auf denen drei der vier untersuchten Transportmedien transportiert werden (Pappkartons, Big Packs und gepresste Ballen).
- **Transport zum Recycler:** In dieser Rubrik ist ausschließlich der Transport vom Textilserviceunternehmen zum Recyclingunternehmen aufgeführt, da hierfür die Randbedingungen für die Bilanzierung sehr genau vorliegen (insbesondere Distanz und Auslastung). Die Ergebnisse sind präzise bestimmbar.
- **Transport - Rest:** Hierunter sind alle weiteren Transporte zusammengefasst, die für die jeweilige Logistikooption benötigt werden, jedoch kein Alttextil befördern. Dies umfasst die Anfahrt der LKW vom Speditionsunternehmen, den Rücktransport der Transportmedien sowie Europaletten und die anschließende Rückfahrt der LKW zum Speditionsunternehmen. Da die hiermit verbundenen Lasten von der sich im Einzelfall unterscheidenden Planung der Speditionsunternehmen abhängen (z. B. von der Kopplung von Rücktransporten an andere Aufträge), können die Ergebnisse dieser Kategorie tendenziell einer größeren Bandbreite unterliegen.
- **Be-/Entladung:** Die Transportmedien werden im Textilserviceunternehmen sowie im Recyclingunternehmen mit elektrisch betriebenen Gabelstaplern verladen.
- **Strom für Ballenpresse:** Die für das Pressen der Ballen nötige elektrische Energie.
- **C-Inventar der Transportmedien:** Der bei der Entsorgung der Materialien in Müllverbrennungsanlagen (in Form von CO<sub>2</sub>) freiwerdende fossile Kohlenstoff.
- **C-Inventar der Bänder:** Der bei der Entsorgung der Polyethylen-Bänder in Müllverbrennungsanlagen (in Form von CO<sub>2</sub>) freiwerdende fossile Kohlenstoff.
- **MVA-Gutschrift Material / Europalette / Bänder:** Gutschrift für erzeugten Strom und/oder Wärme in Müllverbrennungsanlage (MVA).

## 5.2 Vergleich der Logistikooptionen bei kurzer Transportdistanz

Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse für den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der vier betrachteten Logistikooptionen für das Szenario „Regionaltransport“ (kurze Transportdistanz) zwischen Textilserviceunternehmen und Recyclingunternehmen.

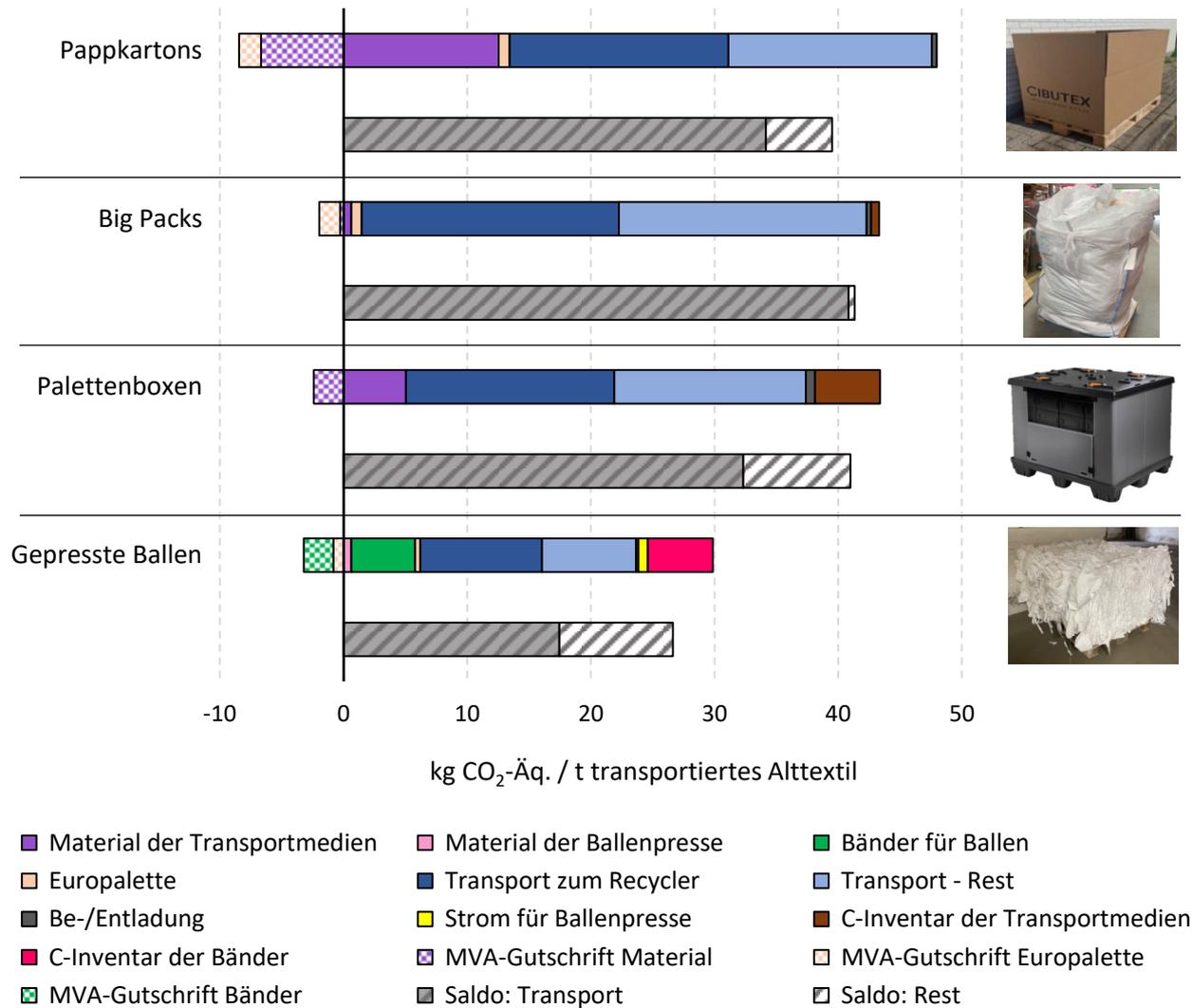


Abbildung 1: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke der vier bilanzierten Logistikooptionen bei vergleichsweise kurzer Transportdistanz (150 km) zwischen Textilserviceunternehmen und Recyclingunternehmen. Abkürzungen: C-Inventar, Kohlenstoffinventar; MVA, Müllverbrennungsanlage. Zur Definition der aufgeführten Einzelrubriken siehe Abschnitt 5.1.

Im Falle der Pappkartons, Big Packs und Palettenboxen wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck vom Transport dominiert, wobei die Fahrten ohne Beladung mit Alttextilien (Transport - Rest) in etwa so viel ausmachen wie der eigentliche Transport der Alttextilien. Bei Pappkartons und Palettenboxen liefern jedoch auch die verwendeten Materialien und deren Entsorgung nennenswerte Beiträge. Hinsichtlich der (Netto-)Gesamtemission (Saldo) sind die drei Transportmedien als gleichrangig zu bewerten. Ursächlich dafür ist, dass die Big Packs zwar einen geringeren Materialaufwand benötigen, aber zu einer niedrigeren Auslastung der LKW und damit einer niedrigeren Transporteffizienz führen. Demgegenüber erweist sich die Verwendung von gepressten Ballen bei der untersuchten Distanz als vorteilhaft, was im Wesentlichen mit der deutlich höheren erreichbaren Auslastung der LKW bei den Ballen zusammenhängt. Die Ballenpresse selbst hat dabei sowohl in der Herstellung wie auch im Betrieb nahezu keinen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

### 5.3 Vergleich der Logistikoptionen bei mittlerer Transportdistanz

Abbildung 2 stellt die Ergebnisse für den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der vier betrachteten Logistikoptionen für das Szenario „Überregionaltransport“ (mittlere Transportdistanz) zwischen Textilserviceunternehmen und Recyclingunternehmen dar.

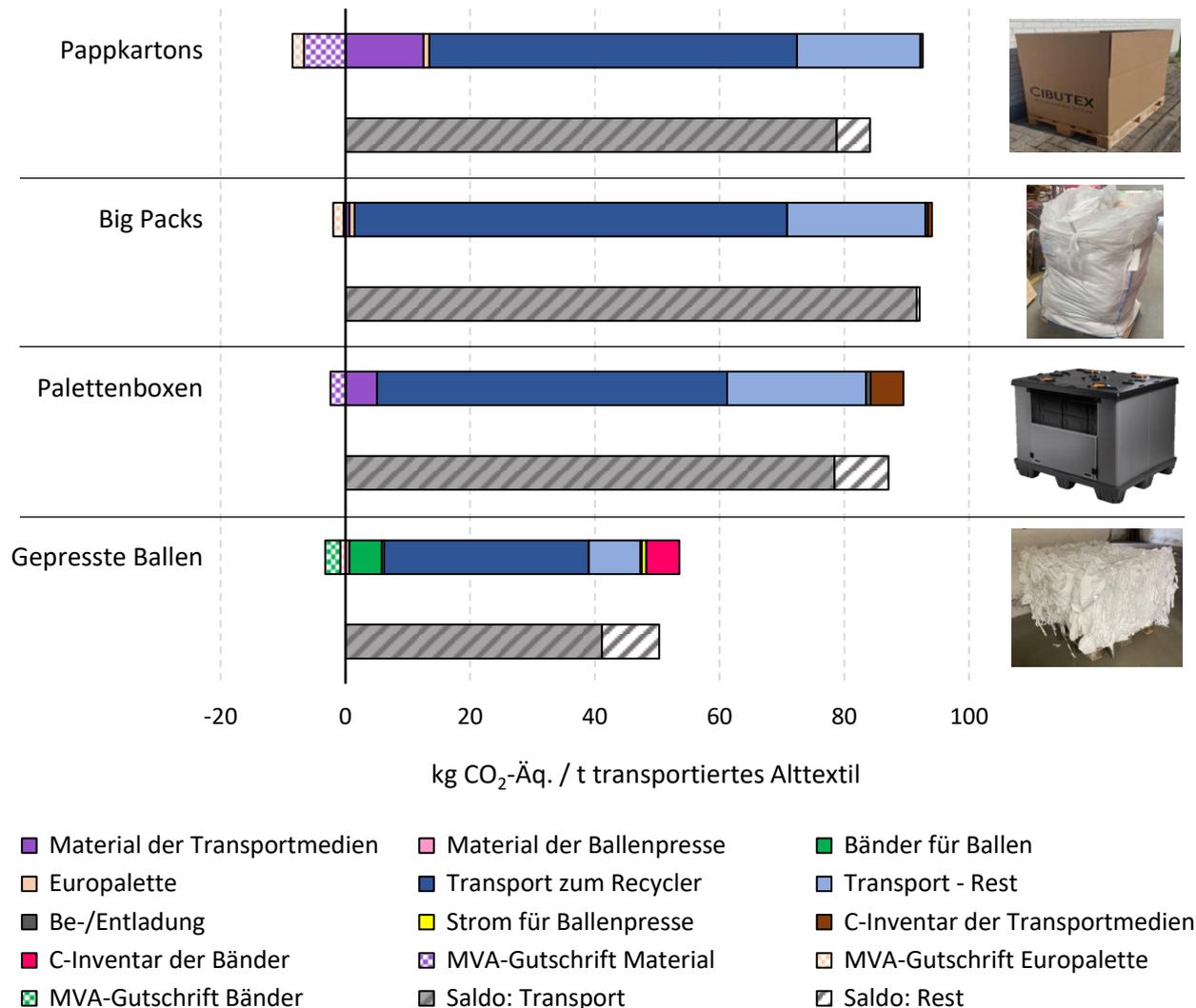


Abbildung 2: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke der vier bilanzierten Logistikoptionen bei einer mittellangen Transportdistanz (500 km) zwischen Textilserviceunternehmen und Recyclingunternehmen. Abkürzungen: C-Inventar, Kohlenstoffinventar; MVA, Müllverbrennungsanlage. Zur Definition der aufgeführten Einzelrubriken siehe Abschnitt 5.1.

Bei der betrachteten mittleren Transportdistanz zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Optionen Pappkartons, Big Packs und Palettenboxen. Analog zur kurzen Transportdistanz dominieren die Transporte die Ergebnisse bei den genannten drei Optionen – hier nun allerdings noch deutlich ausgeprägter. Demgegenüber erweist sich die Verwendung von gepressten Ballen bei der untersuchten Distanz noch vorteilhafter als bei der kurzen Transportdistanz, da die höhere erreichbare Auslastung der LKW bei den Ballen (ca. 80% gegenüber ca. 40% bei den anderen drei Optionen) anteilig noch stärker zum Tragen kommt.

### 5.4 Vergleich der Logistikooptionen bei langer Transportdistanz

Abbildung 3 illustriert die Ergebnisse für den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der vier betrachteten Logistikooptionen für das Szenario „Ferntransport“ (lange Transportdistanz) zwischen Textilserviceunternehmen und Recyclingunternehmen.

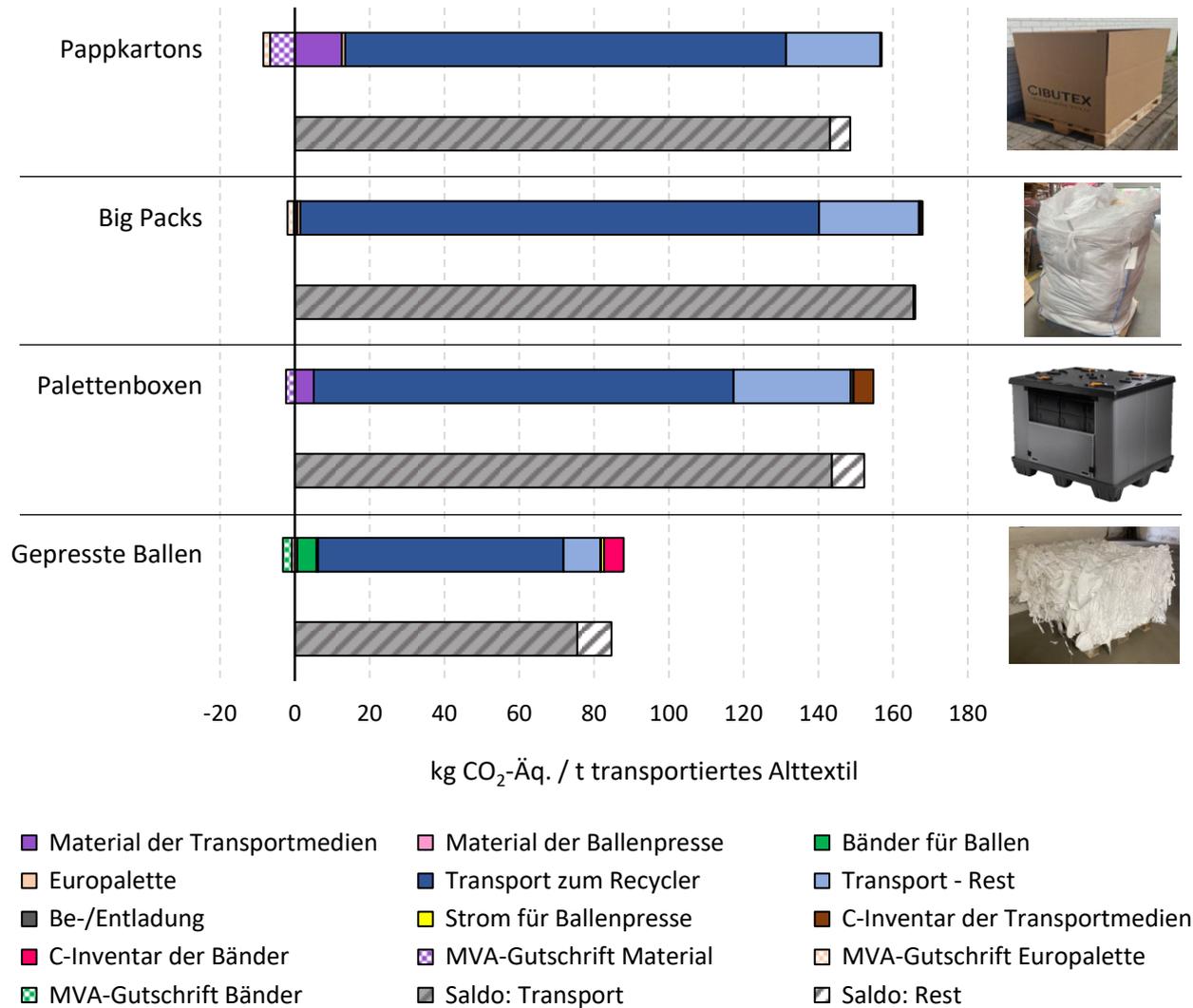


Abbildung 3: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke der vier bilanzierten Logistikooptionen bei vergleichsweise langer Transportdistanz (1.000 km) zwischen Textilserviceunternehmen und Recyclingunternehmen. Abkürzungen: C-Inventar, Kohlenstoffinventar; MVA, Müllverbrennungsanlage. Zur Definition der aufgeführten Einzelrubriken siehe Abschnitt 5.1.

Bei langen Transportdistanzen sind die gepressten Ballen gegenüber den anderen drei Optionen deutlich vorteilhafter, da die wesentlich höhere erreichbare Auslastung der LKW bei den Ballen (ca. 80% gegenüber ca. 40% bei den anderen drei Optionen) ergebnisbestimmend ist. Bei den drei Optionen Pappkartons, Big Packs und Palettenboxen wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck bei langen Transportdistanzen nahezu vollständig vom Transport bestimmt; die Produktion der Materialien sowie die Entsorgung sind bei Distanzen im Bereich von 1.000 km folglich vernachlässigbar.

## 5.5 Zusammenführung der Ergebnisse

Im Folgenden sind die wichtigsten aus den Abschnitten 5.2 bis 5.4 ableitbaren Ergebnisse stichpunktartig zusammengeführt.

- Das Gesamtergebnis für den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck wird bei allen untersuchten Logistikooptionen von den Transporten dominiert.
- Die drei Logistikooptionen Pappkartons, Big Packs und Palettenboxen sind aus Klimaschutzsicht als gleichrangig zu bewerten. Hier gibt es also weder eine vorteilhafte noch eine nachteilige Option. Dies gilt uneingeschränkt für alle betrachteten Transportdistanzen.

Weiterführende Informationen: Diese Aussage gilt, obwohl die beiden Hauptbeiträge zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck nicht analog verlaufen: Im Falle der Pappkartons und Palettenboxen ist sowohl der mit dem Transport verbundene, d. h. wesentlich vom Auslastungsgrad auf dem LKW bestimmte, als auch der mit der Produktion und Recycling bzw. Entsorgung der Transportmedien verbundene Beitrag zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck ähnlich hoch. Die geringfügigen Unterschiede, die je einmal zugunsten der Pappkartons und der Palettenboxen ausfallen, gleichen sich dabei unter dem Strich aus. Im Falle der Big Packs ist der Auslastungsgrad auf dem LKW etwa 10 % niedriger als bei den anderen beiden Transportmedien, weshalb der Beitrag des Transports zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck ansteigt. Jedoch fallen die mit Produktion und Recycling bzw. Entsorgung der Big Packs verbundenen Lasten aufgrund des vergleichsweise niedrigen Materialaufwandes relativ gering aus. In Summe liegt der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Big Packs daher über alle Distanzen hinweg gleichauf mit den anderen beiden Transportmedien. Kurz zusammengefasst: dass die drei angeführten Logistikooptionen annähernd gleiche CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke aufweisen, ist nicht systembedingt, sondern der Tatsache geschuldet, dass sich die durchaus im Einzelfall ergebnisrelevanten Einzeleffekte wie insbesondere Auslastungsgrad sowie Produktion und Entsorgung der Transportmedien bei den hier betrachteten Randbedingungen in etwa ausgleichen.

- Die vierte Option, die gepressten Ballen, erweisen sich dagegen aus Klimaschutzsicht als richtungssicher vorteilhaft im Vergleich zu den drei anderen Transportmedien. Dies gilt über alle Transportdistanzen hinweg.

Weiterführende Informationen: Der Grund dafür ist, dass die LKW bei den gepressten Ballen zu etwa 80 % ausgelastet werden können, während der Auslastungsgrad bei den anderen drei Optionen lediglich ca. 40 % beträgt und der Transport – wie oben aufgeführt – die Ergebnisse deutlich dominiert. Da der zweithöchste Anteil am CO<sub>2</sub>-Fußabdruck vom Materialaufwand zur Produktion der Kunststoffbänder ausgemacht wird und dieser bei allen drei Distanzen gleich ist, kommt der positive Effekt der höheren Auslastung bei kürzeren Distanzen zwischen Textilserviceunternehmen und Recycler nicht so ausgeprägt zum Tragen wie bei längeren Distanzen.

- Herstellung und Betrieb der Ballenpresse haben nahezu keinen Einfluss auf das Gesamtergebnis.
- Europaletten sowie der für die Be- und Entladung der LKW nötige Strom sind bei allen vier Logistikooptionen ebenfalls vernachlässigbar.

## 6 Verwendbarkeit, Übertragbarkeit und Relevanz

---

### Verwendbarkeit

Die Ergebnisse dieser Untersuchung, die sich auf die qualitativen Unterschiede zwischen den Ergebnissen für den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der vier betrachteten Logistikooptionen beziehen, kann als äußerst robust angesehen werden.

Die *absoluten* Ergebnisse hängen jedoch in besonderem Maß von den zugrunde gelegten Randbedingungen ab und können sich bei Änderung der Werte bei den Parametern Auslastung, Transportdistanz usw. entsprechend ändern. Insbesondere können hier auch die mittelbar mit dem Haupttransport der Alttextilien vom Textilserviceunternehmen zum Recyclingunternehmen verbundenen zusätzlichen Transporte eine wichtige Rolle spielen. In diesem Zusammenhang ist auch das Gewicht der Kunststoffbänder für die Ballen aufzuführen, das sich in besonderem Maße auf die Ergebnisse niederschlägt.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde der Transport durch Speditionsunternehmen betrachtet. In anderen Fällen, also wenn der Transport beispielsweise von firmeneigenen Fahrzeugen der Textilserviceunternehmen durchgeführt wird, können vor allem die An- und Abfahrtswege wie auch die Rücktransporte der Mehrfachbehälter im Vergleich zu denen bei Speditionsunternehmen zum Teil deutlich anders ausfallen. Dies würde sich quantitativ in dem Teilbeitrag "Transport - Rest" bemerkbar machen.

### Übertragbarkeit

Diese Untersuchung hatte zum Ziel, einen Systemvergleich verschiedener Transportmedien durchzuführen. Deswegen können die Ergebnisse nicht auf einzelne Betriebe des Textilservice- bzw. Recyclinggewerbes angewendet werden, da dort firmenspezifische Verhältnisse vorliegen. Dies betrifft allen voran die spezifischen Verhältnisse bei den Transporten. Das sind unter anderem der eingesetzte Fuhrpark (falls keine Speditionsunternehmen beauftragt werden), die firmenspezifischen Transportentfernungen und auch möglicherweise stattfindende Sammelfahrten.

Die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke lassen sich qualitativ auch auf einige andere Umweltwirkungskategorien übertragen, nämlich auf solche, bei denen die LKW-Transporte einen besonders hohen Anteil an der Wirkungskategorie aufweisen: Dazu gehören insbesondere Photosmog, Versauerung und terrestrische Eutrophierung. Ebenso lassen sich die Ergebnisse qualitativ auf die Ressourcennutzung von erschöpflichen Energieträgern übertragen.

### Relevanz

Neben der Frage der direkten Anwendbarkeit ist in diesem Zusammenhang auch die Relevanz der Ergebnisse einzuordnen: In dieser Studie wurde nur ein sehr kleiner Ausschnitt im Lebenszyklus eines Textils bzw. des Textilrecyclings betrachtet. Hier bewegt man sich im Bereich von ca. 150 kg CO<sub>2</sub>-Äq./Tonne Textil. Über den gesamten Lebensweg betrachtet verursachen Textilien jedoch ein Vielhundertfaches an CO<sub>2</sub>-Emissionen. Selbst bei einem einfachen T-Shirt, das circa 50.000 kg CO<sub>2</sub>-Äq./Tonne über den gesamten Lebensweg verursacht, liegt man beim 500-fachen. Insofern ist dieser Sachverhalt bei der Verwendung der hier erhaltenen Ergebnisse, z. B. im Rahmen von darauf basierenden Entscheidungen oder von Strategieentwicklungen, zu berücksichtigen und gegebenenfalls in den Kontext erreichbarer Wirkungstiefen – auch in Bezug auf die anstehende Textilwende – zu stellen.

## 7 Schlussfolgerungen

---

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich ziehen:

- **Pappkartons, Big Packs und Palettenboxen:** Die vorliegenden Ergebnisse machen deutlich, dass die Wahl eines dieser drei Transportmedien keinen bedeutenden Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Transports von Alttextilien hat. Dies erklärt sich im Falle der Pappkartons, Big Packs und Palettenboxen durch die ähnliche Auslastung der LKW und den damit verbundenen ähnlich hohen Kraftstoffverbrauch, der die Gesamtbilanz bei Weitem dominiert. Dieser stellt somit den mit Abstand entscheidenden Faktor für die Gesamtemissionen dar. Maßnahmen, die eine Erhöhung der Auslastung sowie eine generelle Reduzierung der Fahrten bewirken, sind daher anderen Anstrengungen, z. B. hin zu recycelten Materialien, vorzuziehen.
- **Gepresste Ballen:** Die etwa doppelt so hohe Auslastung, wie sie bei Verwendung von gepressten Ballen erreicht wird, stellt einen genuinen Vorteil dieser Transportoption dar. Dass dieser Effekt in der Gesamtbetrachtung nicht noch deutlicher zum Tragen kommt, liegt hier ausschließlich an den Kunststoffbändern. Da diese im Gegensatz zu den anderen Transportmedien nach nur einer einmaligen Nutzung entsorgt werden, haben sie selbst bei langen Transportdistanzen noch einen Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Während die Verwendung von recyceltem Polyethylen hier erfahrungsgemäß nur geringfügige Verbesserungen bewirken würde, könnte ein Austausch der Bänder durch wiederverwendbare Alternativen lohnenswert sein. Bei Einsatz von Einmal-Kunststoffbändern sollte auf minimal mögliches Gewicht geachtet werden.
- **Logistik LKW:** Eine geschickte Kopplung von Aufträgen auf Seiten der Speditionsunternehmen zur Minimierung von nicht voll ausgelasteten Fahrten könnte einen weiteren Beitrag zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten.
- **Optimierung der Transportmedien:** Die Optimierung der Lebensdauer der Transportmedien sowie der verwendeten Materialien sind – mit Ausnahme der für die gepressten Ballen benötigten Kunststoffbänder – als nachrangig anzusehen.
- **LKW-Antrieb:** Da die LKW-Transporte die CO<sub>2</sub>-Ergebnisse maßgeblich bzw. zum Teil nahezu ausschließlich dominieren, kann neben einer Optimierung der Auslastung auch ein Wechsel zu alternativen Antriebstechnologien wie insbesondere batterieelektrische LKW (BEV-LKW) lohnenswert sein.
- **Relevanz der Ergebnisse:** Wie oben unter „Relevanz“ ausgeführt, sollte in Fällen, bei denen die Ergebnisse dazu dienen, grundsätzlich richtungsweisende Technologien zu fördern, dies im Kontext der relativ geringen Bedeutung des untersuchten Lebenswegabschnitts im Gesamtlebensweg eines Textils – auch im Recycling – sorgfältig abgewogen werden.

## 8 Literatur

---

Ecoinvent (Ifd.): ecoinvent-Datenbank. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.

ifeu (2024): Kontinuierlich aktualisierte interne ifeu-Datenbank. IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg.

IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

ISO (2019): DIN EN ISO 14067:2019 Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung.

ISO (2021a): DIN EN ISO 14040:2021 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.

ISO (2021b): DIN EN ISO 14044:2021 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.