

Vorderer Deckel (Umschlagdeckel)

Rückendeckel am Ende

Gebrüder Otto Baumwollfeinzwirnerei GmbH & Co. KG
und
Technische Hochschule Augsburg

ECO YARN – Entwicklung von Ringgarn aus Post-Consumer-Recycling Baumwolle

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt gefördert unter dem
Az: 39607/01-21/2 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Bearbeitungszeitraum: 15.07.2024 – 31.10.2025

Verfasser/innen: Andreas Merkel (Gbr. Otto)
 Oliver Kächler (Gbr. Otto)
 Prof. Dr. Mesut Cetin (THA)
 Loraine Labus (THA)
 Dr.-Ing. Georg Stegschuster (THA)
 Amon Krichel (THA)
 Nicole Hühn (THA)
 Bettina Cherdron (THA)

Dietenheim, 13.02.2026

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	VII
Zusammenfassung	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	2
1.2 Projektvorhaben	2
2 Hauptteil	4
2.1 Arbeitspaket 1: Spezifizierung der Anforderungen	4
2.1.1 Systematische Gegenüberstellung von Post-Consumer-Recycling-, Post-Industrial-Recycling- und Virgin-Baumwolle zur Anforderungsableitung	4
2.1.2 Definition der qualitätsrelevanten Anforderungen	6
2.1.3 Entwicklung und Validierung einer Sortiervorschrift für Miettextilien	10
2.1.4 Fazit Arbeitspaket 1: Spezifizierung der Anforderungen	13
2.2 Arbeitspaket 2: Aufbereitung der Textilien	13
2.2.1 Bewertung der Trenntechnik und Ableitung des Aufbereitungsprozesses..	13
2.2.2 Auswahl und Umsetzung des Aufbereitungsverfahrens.....	15
2.3 Arbeitspaket 3: Evaluierung des Reißprozesses.....	15
2.3.1 Definition der Reißfaserqualität	16
2.3.2 Methodisches Vorgehen zur Optimierung der Reißfaserqualität	16
2.3.3 Screening der Prozessparameter (Plackett-Burman).....	17
2.3.4 Vergleich des Referenzprozesses recot ² ®.....	23
2.3.5 Zusammenfassung und Bewertung	26
2.4 Arbeitspaket 4: Untersuchung der Spinnereivorbereitung und Spinnerei .	26
2.4.1 Materialauswahl und Eigenschaften	27
2.4.2 Untersuchungsraum und Methodik	27
2.4.3 Vorversuche zur Validierung des Rezyklatanteils im Garn.....	28
2.4.4 Prozessoptimierung und Versuchsdurchführung Karde TC11	30
2.4.5 Versuchsdurchführung Strecke TD8.....	31
2.4.6 Prozessoptimierung und Versuchsdurchführung am Flyer.....	31
2.4.7 Prozessoptimierung und Versuchsdurchführung an der Ringspinnmaschine 32	
2.4.8 Hauptspinnversuche bei Otto	34
2.4.9 Fazit zu Arbeitspaket 4	35
2.5 Arbeitspaket 5: Validierung der technischen Machbarkeit.....	36
2.5.1 Herstellung der Frottierhandtücher aus Post-Consumer-Recycling Garnen 36	

2.5.2	Zusammenfassende Bewertung der technischen Umsetzbarkeit.....	38
2.5.3	Identifizierter Entwicklungs- und Forschungsbedarf.....	39
2.6	Arbeitspaket 6: Life Cycle Assessment.....	40
2.6.1	Zielsetzung und Einordnung der Ökobilanz	40
2.6.2	Untersuchungsrahmen und methodische Grundlagen	41
2.6.3	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	41
2.6.4	Interpretation der Ergebnisse im Projektkontext	43
3	Fazit.....	45
4	Literaturverzeichnis	48
5	Anhang.....	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: ECO YARN Frottierhandtuch	9
Abbildung 2: Mittlere Faserlänge per number L(n) des Plackett Burmann Versuchsplan Bettwäsche	19
Abbildung 3: Standardisierte Effekte Plackett-Burmann L(n) Bettwäsche	20
Abbildung 4: Probleme bei Produktion mit Handtüchern	21
Abbildung 5: Standardisierte Effekte Plackett Burmann L(n) Handtücher	22
Abbildung 6: Mittlere Faserlänge L(n) per number für die Optimierungsversuche der Bettwäsche	23
Abbildung 7: Multidimensionale Gegenüberstellung der AFIS-Faserparameter von ECO YARN- und recot ² @-Reißfasern	25
Abbildung 8: Garntafeln zu den Vorversuchen mit unterschiedlichen Anteilen gerissener Geschirrhandtüchern und Bettwäsche in Mischung mit Virgin-Baumwolle	29
Abbildung 9: Dickstellen in der Kette	38
Abbildung 10: Wirkungskategorie Klimawandel – Vergleich der Szenarien bezogen auf die Herstellung eines Frottierhandtuchs	42
Abbildung 11: Ökologie-Index – Vergleich der Szenarien bezogen auf die Herstellung eines Frottierhandtuches	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Qualitative Einordnung der Materialeigenschaften von PCR-CO, PIR-CO und VIR-CO	5
Tabelle 2: Sortiervorschrift für Miettextilien zur Herstellung von Recyclingfasern .	11
Tabelle 3: Praxisnahe Bewertung verschiedener Trenntechniken im Rahmen der textilen Aufbereitung	15
Tabelle 4: Plackett-Burmann Screeningversuchsplan ECO YARN	18
Tabelle 5: AFIS PRO 2 basierte Faserkennwerte der ECO YARN-Reißfasern (PCR) im Vergleich zu recot ² ®-Reißfasern (PIR)	25
Tabelle 6: Eigenschaften der verwendeten PCR-CO und VIR-CO.....	27
Tabelle 7: Kardenbandvergleich zwischen Bändern aus 100 % VIR-CO und der Fasermischung aus 30 % PCR-CO zu 70 % VIR-CO.....	30
Tabelle 8: Ergebnisse der Garnherstellung zu Gleichmäßigkeit und Haarigkeit....	32
Tabelle 9: Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen am Garn	33
Tabelle 10: Garnparameter für Nm 27/1 und Nm 40/2.....	34
Tabelle 11: Vergleich Ring- und Rotorgarnherstellung	35

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

CO	Baumwolle
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
PIR-CO	Post-Industrial-Recycling-Baumwolle
PCR-CO	Post-Consumer-Recycling-Baumwolle
LCA	Life Cycle Assessment
Otto	Gebr. Otto Baumwollfeinzwirner GmbH + Co. KG
THA	Technische Hochschule Augsburg
VIR-CO	Virgin-Baumwolle

Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und ökologische Bewertung eines Recyclingprozesses zur Herstellung eines Frottierhandtuchs aus Post-Consumer-Alttextilien des Mietwäschesektors. Im Fokus stand die teilweise Substitution von Primärbaumwolle unter Berücksichtigung industrieller Produkt- und Prozessanforderungen.

Hierzu wurden produkt- und prozessbezogene Anforderungen definiert sowie eine Sortiervorschrift zur Identifikation geeigneter 100 % Baumwoll-Alttextilien entwickelt. Die Textilien wurden manuell aufbereitet, im Reißprozess zu Stapelfasern zerfasert und hinsichtlich maximaler mittlerer Faserlänge optimiert. Das Recyclingmaterial wurde mit Virgin-Baumwolle gemischt, kardierte, versponnen und zu einem Walk-Frottier-Gewebe verarbeitet. Abschließend wurde ein Demonstrator gefertigt. Parallel erfolgte eine Lebenszyklusanalyse (LCA) im Vergleich zu einem Referenzprozess aus 100 % Virgin-Baumwolle.

Die Herstellung eines marktfähigen Frottierhandtuchs mit 30 % Post-Consumer-Recyclingfasern konnte technisch nachgewiesen werden. Die geforderten mechanischen Garnkennwerte wurden erreicht. Gleichzeitig zeigten sich prozessbedingte Herausforderungen, insbesondere eine hohe Ausschussrate im Reißprozess, erhöhte Kurzfaserteile im Garn sowie ein daraus resultierender starker Faserflug und Maschinenstillstände in der Spinnerei und Weberei.

Die ökologische Bewertung belegt trotz nicht vollständig optimierter Prozessführung einen klaren Umweltvorteil des Recyclingansatzes. Das Treibhauspotenzial konnte von 10,8 kg CO₂-Äquivalenten (Referenzprozess) auf 10,0 kg CO₂-Äquivalente pro Handtuch reduziert werden. Insbesondere der aggregierte Ökologie-Index reduzierte sich um 17 % von 0,17 im Referenzprozess auf 0,14 für das ECO YARN-Handtuch. Damit wurde das ökologische Potenzial der Rückführung von Baumwollfasern in den textilen Kreislauf bestätigt.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Reduktion von Ausschuss und Steigerung des Durchsatzes im Reißprozess, der Analyse der Faserschädigung, der Optimierung der Kardierung für Recyclingfasern sowie der Bewertung geeigneter Spinntechnologien und Spinnhilfsmittel. Ziel ist die wirtschaftliche Stabilisierung und Skalierung des Recyclingprozesses bei erhöhtem Recyclinganteil.

Das Vorhaben wurde in Kooperation mit Gebr. Otto Baumwollfeinzwirner GmbH + Co. KG (Otto), der Technischen Hochschule Augsburg (THA), Weseta AG, Engi, Schweiz und Schwob AG, Burgdorf, Schweiz durchgeführt und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert (Az.: 39607/01-21/2). Der vollständige Abschlussbericht ist über die DBU erhältlich.

1 Einleitung

Weltweit werden bislang weniger als ein Prozent der Textilien stofflich recycelt. Gleichzeitig zählt der Textil- und Bekleidungssektor zu den ressourcen- und emissionsintensivsten Industriezweigen und verursacht erhebliche Belastungen von Wasser- und Landressourcen sowie relevante Treibhausgasemissionen [EII17]. Diese Rahmenbedingungen verdeutlichen, dass insbesondere die Rückführung textiler Altprodukte in geschlossene Stoffkreisläufe ein zentrales Handlungsfeld für Klima- und Ressourcenschutzziele darstellt.

Die Etablierung funktionierender Recyclingstrategien für Alttextilien ist jedoch mit hohen technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen verbunden. Insbesondere die große Material- und Strukturvielfalt von Bekleidungs- und Heimtextilien erschwert eine sortenreine Erfassung und eine hochwertige Weiterverarbeitung. Bereits der erste Prozessschritt, die Sortierung, stellt daher eine wesentliche Hürde für das textile Recycling dar. Während die Heterogenität textiler Materialien vielfältige Anwendungen ermöglicht, wirkt sie sich im Recyclingprozess nachteilig aus.

Zur Rückführung textiler Abfälle in den Produktionsprozess stehen unterschiedliche Recyclingstrategien zur Verfügung. Für Naturfasern wie Baumwolle (CO) kommt dem mechanischen Recycling dabei eine besondere Bedeutung zu. Nur bei diesem Verfahren bleibt die Faser in ihrer stofflichen Identität erhalten, während chemische Recyclingprozesse zu einer Auflösung der Faserstruktur führen und damit keinen direkten Faser-zu-Faser-Kreislauf für CO ermöglichen. Gleichzeitig wird das mechanische Recycling bereits heute im industriellen Maßstab eingesetzt und gilt im Vergleich zu chemischen Verfahren als wirtschaftlich effizient und umweltschonend.

Der überwiegende Teil der bislang etablierten mechanischen Recyclinganwendungen basiert jedoch auf post-industriellen Textilabfällen wie Restgarnen, Schnittresten oder Produktionsabfällen. Die stoffliche Wiederverwertung von Post-Consumer-Textilien ist aufgrund fehlenden Prozesswissens und technologischer Limitierungen bislang kaum etabliert. In der Praxis führt dies häufig zu Downcycling-Anwendungen, bei denen hochwertige Baumwolltextilien in niederwertigen Produkten eingesetzt werden [Ste22]. Das grundlegende Ziel der Kreislaufwirtschaft, die Rückführung eines Produktes in eine gleichwertige Anwendung, wird damit verfehlt.

Insbesondere im Bereich der Spinnereivorbereitung bestehen weiterhin wesentliche Forschungslücken. Es fehlt an systematischem Prozesswissen, wie mechanisch recycelte Baumwollfasern aus Post-Consumer-Textilien so aufbereitet werden können, dass sie erneut zu hochwertigen Ringgarnen versponnen und in qualitativ vergleichbaren textilen Produkten eingesetzt werden können. Eine ganzheitliche Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Aufschluss, Faseraufbereitung und Garnbildung ist bislang nur unzureichend erfolgt.

1.1 Stand der Technik

Im Rahmen eines INTERREG-Vorhabens wurde das Rotorspinnverfahren gezielt angepasst, um die Verarbeitung von Garnen mit einem Anteil von bis zu 100 % recycelten Mischfasern zu ermöglichen [Sen19]. Weitere Arbeiten befassen sich mit der Produktion von Rotorgarnen auf Basis recycelter Fasern und untersuchen dabei insbesondere den Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf die resultierenden Garnkennwerte [Dur03], [Hal09], [Has10]. Demgegenüber liegen bislang nur in begrenztem Umfang Untersuchungen zur Herstellung qualitativ hochwertiger Ringgarne aus Recyclingfasern vor. Im Projekt „ECAP“ wurde ein Netzwerk für Hersteller von Arbeitsbekleidung etabliert, in dem Reißfasern in Bekleidungstextilien integriert und Garne im Rotorspinnverfahren erzeugt wurden [Wra19]. Im ZIM-Kooperationsnetzwerk „Re4Tex“ werden Technologien zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus textilen Produktionsabfällen entwickelt, wobei auch bislang nicht aufgelöste Abfallfraktionen berücksichtigt werden [Säc24]. Das STFI und die DITF erarbeiteten eine Klassifizierung von Recyclingfasern und untersuchten Reißprozesse anhand von Baumwoll-T-Shirts und Aramid-Produktionsabfällen [BL22]. Das Projekt „DiTex“ zielt auf die Umsetzung eines vollständigen Faser-zu-Faser-Recyclings ab und untersucht hierfür kreislauffähige Produktkonzepte, beispielsweise durch den Einsatz intelligenter Etiketten sowie Rezyklatfasern in Berufsbekleidung und Bettwäsche. Der Fokus der Untersuchungen lag dabei ausschließlich auf Polyester-Rezyklaten, wohingegen Post-Consumer-Recyclingbaumwolle (PCR-CO) nicht betrachtet wurde. [Dit22] Eine ganzheitliche Analyse der prozesstechnischen Wechselwirkungen zwischen Reißaggregat und Kardierung erfolgte in den genannten Arbeiten nicht. Zusammenfassend fällt auf, dass eine deutliche Forschungslücke hinsichtlich der Entwicklung hochwertiger Ringgarne auf Basis von PCR-CO sowie deren Einsatz in geschlossenen Kreisläufen besteht.

1.2 Projektvorhaben

Im Unterschied zu dem bestehenden Produkt „recof²®“ der Firma Gebr. Otto Dietenheim GmbH + Co. KG (Otto), das 25 % recycelte CO aus postindustriellen Abfällen enthält [Ott24], lag der Fokus des vorliegenden Vorhabens auf der Verwendung von PCR-CO. Es wird das Ziel verfolgt, einen geschlossenen textilen Kreislauf auf Basis von PCR-CO zu entwickeln und praxisnah zu demonstrieren. Durch eine gezielte Weiterentwicklung und Abstimmung der Prozesse in der Spinnereivorbereitung soll die Herstellung hochwertiger Ringgarne mit einem Anteil von 30 % PCR-CO ermöglicht werden. Ergänzend wird ein realer Stoffkreislauf im Bereich der Mietwäsche aufgebaut, in dem gebrauchte Frottierhandtücher gesammelt, mechanisch recycelt, zu neuen Garnen versponnen und erneut zu Handtüchern verarbeitet werden. Ziel ist es, die technische Machbarkeit eines Faser-zu-Faser-Recyclings für Baumwollfrottierwaren aufzuzeigen und damit einen Beitrag zur Schließung textiler Kreisläufe zu leisten.

Die Kooperation zwischen der Technischen Hochschule Augsburg (THA), der Gebr. Otto Baumwollfeinzwirnerei GmbH + Co. KG (Otto), Weseta Textil AG, Engi, Schweiz und Schwob AG, Burgdorf, Schweiz bildete hierfür die Grundlage. Eine begleitende Lebenszyklusanalyse der bifa Umweltinstitut GmbH bewertete die ökologischen Auswirkungen des geschlossenen Kreislaufs. Die während des Projektes gewonnenen Erkenntnisse in jeglichen Bereichen sollen als Grundlage für eine industrielle Etablierung von PCR-CO-Ringgarnen dienen und können auf weitere textile Anwendungen und Prozessketten übertragen werden.

2 Hauptteil

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete des Projekts ECO YARN dargestellt. Das Vorhaben hat seine zentralen Ziele weitgehend erreicht. Ein Großteil der im Antrag geplanten Maßnahmen konnte direkt erfolgreich umgesetzt werden und ein Teil der Ziele musste entsprechend der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse angepasst werden. Der Prozess des Reißens wurde als zentraler Ausgangspunkt zur Gewinnung qualitativ hochwertiger Recyclingfasern identifiziert und gezielt optimiert, da er die wesentliche Grundlage für die Herstellung eines qualitativ hochwertigen Endproduktes bildet. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass die Reißfasern trotz Optimierung mit den in diesem Projekt verwendeten Ansätzen zu kurz für höhere Rezyklatanteile als 30 % sind.

2.1 Arbeitspaket 1: Spezifizierung der Anforderungen

Ziel des Arbeitspakets 1 ist die systematische Definition der qualitätsrelevanten Anforderungen an Produkt und Prozess für die Herstellung eines Frottierhandtuchs unter Verwendung von Recyclingfasern. Hierzu werden PCR-CO, Produktionsreste (Post-Industrial-Recycling-Baumwolle, PIR-CO) sowie Virgin-Baumwolle (VIR-CO) vergleichend betrachtet, um materialspezifische Eigenschaften, Einschränkungen und Potenziale strukturiert herauszuarbeiten.

Auf Grundlage dieses Materialvergleichs werden produkt- und prozessbezogene Anforderungskataloge abgeleitet, die als Referenzrahmen für die nachfolgenden Entwicklungs- und Validierungsschritte dienen. Ergänzend wird eine Sortiervorschrift für ausgediente Miettextilien erarbeitet, um die definierte Materialbasis gezielt für den weiteren Projektverlauf bereitzustellen. Damit wird in Arbeitspaket 1 die methodische und inhaltliche Grundlage für die Bewertung der Prozessstabilität, der Produktqualität sowie der prinzipiellen Recyclingfähigkeit entlang der betrachteten Prozesskette geschaffen.

2.1.1 Systematische Gegenüberstellung von Post-Consumer-Recycling-, Post-Industrial-Recycling- und Virgin-Baumwolle zur Anforderungsableitung

Die Anforderungsdefinition orientiert sich an der Projektzielsetzung, aus ausgedienten Miettextilien neue Frottierhandtücher herzustellen. Hierzu wurde PCR-CO systematisch mit Produktionsresten aus CO sowie VIR-CO verglichen. Der Materialvergleich bildet die Grundlage zur strukturierten Ableitung der Anforderungen an die einzusetzenden Fasermaterialien und für die nachfolgenden produkt- und prozessbezogenen Anforderungskataloge.

Methodischer Rahmen ist die Richtlinie VDI 2221, die eine systematische und nachvollziehbare Erarbeitung funktionaler, qualitativer und randbedingungsbezogener Anforderungen ermöglicht. Der anwendungsbezogene Vergleich der Materialkategorien hinsichtlich ihrer Eignung für den betrachteten Recycling- und Herstellungsprozess basiert auf quantitativen Messwerten, projektspezifischen Erfahrungswerten des Konsortiums sowie materialtechnischen Grundannahmen. Weitere Eigenschaften, darunter Zugfestigkeit, Grad der Faserschädigung infolge mechanischer Beanspruchung, Spinnfähigkeit, zu erwartender Ausschuss, Verfügbarkeit, Materialkosten sowie Nachhaltigkeit, werden qualitativ bewertet. Diese Einschätzung basiert auf bekannten materialtechnischen Zusammenhängen, der projektspezifischen Anwendung sowie auf den Erfahrungen der Projektpartner entlang der textilen Prozesskette. Die qualitative Bewertung erfolgt relativ zwischen den Materialkategorien und dient der vergleichenden Einordnung.

Tabelle 1: Qualitative Einordnung der Materialeigenschaften von PCR-CO, PIR-CO und VIR-CO

Eigenschaften	PCR-CO	POI-CO	VIR-CO
Mittlere Faserlänge L(n)	8 – 13 mm	12 - 15mm	18 - 45 mm
Zugfestigkeit	Mittel	Mittel - Hoch	Hoch
Grad der Faserschädigung	Hoch	Mittel	Gering
Materialverlust	Hoch	Mittel	Gering
Spinnfähigkeit	Gering	Mittel	Hoch
Abnahmenge/Verfügbarkeit	Hoch	Mittel	Hoch
Materialkosten	Gering	Mittel	Hoch
Nachhaltigkeit	Hoch	Mittel	Abhängig von der Art des Anbaus (konventionell oder bio)

Die qualitative Einordnung der Materialeigenschaften in die Kategorien *hoch*, *mittel* und *gering* erfolgt auf Grundlage der beschriebenen quantitativen und qualitativen Informationen. Diese Einteilung dient der vergleichenden Bewertung der Materialklassen und stellt keine absolute Einstufung dar. In Tabelle 1 sind diese Einordnung zusammengefasst und eine Übersicht zur Gegenüberstellung von PCR-CO, PIR-CO und VIR-CO als Grundlage für die weitere Anforderungsdefinition gegeben.

Der Materialvergleich zeigt, dass PCR-CO gegenüber VIR-CO hinsichtlich Faserlänge, Faserschädigung und prozessbedingter Verluste eingeschränkte technische Eigenschaften aufweist, gleichzeitig jedoch einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der projektbezogenen Nachhaltigkeitsziele leistet. PIR-CO nimmt eine intermediäre Position ein und wird im weiteren Projektverlauf nicht prozesstechnisch untersucht, sondern ausschließlich für vergleichende Bewertungen herangezogen.

Vor diesem Hintergrund fokussiert das Projekt den Einsatz von Fasermischungen aus PCR-CO und VIR-CO, um technische Einschränkungen des Recyclingmaterials zu kompensieren und zugleich einen signifikanten Rezyklatanteil zu realisieren. Das festgelegte Mischungsverhältnis bildet die Grundlage für die nachfolgenden produkt- und prozessbezogenen Anforderungskataloge sowie die weitere Ausgestaltung der Prozesskette.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus dem Materialvergleich werden im folgenden Kapitel die qualitätsrelevanten Anforderungen an Produkt und Prozess abgeleitet. Dabei werden die materialspezifischen Eigenschaften von PCR-CO und deren Auswirkungen auf Verarbeitbarkeit, Produktqualität und Prozessstabilität gezielt berücksichtigt und in konkrete Anforderungen überführt.

2.1.2 Definition der qualitätsrelevanten Anforderungen

Die Festlegung der Spezifikationen für das textile Endprodukt erfolgte in gemeinschaftlicher Abstimmung des Projektkonsortiums mit dem Ziel, ein gebrauchsfähiges Frottierhandtuch für den Einsatz in Mietwäschesystemen mit einem möglichst hohen Anteil an Recyclingfasern zu entwickeln. Dabei wurden sowohl funktionale, mechanische und gestalterische Anforderungen an das Produkt als auch qualitätsrelevante Parameter des zugrunde liegenden Produktionsprozesses berücksichtigt. Im Folgenden werden die produkt- und prozessbezogenen Anforderungen jeweils in Form eines technischen Anforderungskatalogs dargestellt.

2.1.2.1 Produktbezogene Anforderungen

Zur Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit und Prozessstabilität des entwickelten Frottierhandtuchs werden produktspezifische Anforderungen in Bezug auf Material, Garn, Flächenstruktur sowie Design systematisch definiert. Grundlage hierfür bildeten die Anforderungen des Einsatzes in industriellen Mietwäschesystemen sowie die Zielsetzung, einen möglichst hohen Anteil an Recyclingfasern zu integrieren.

Als Faserrohstoff wird CO eingesetzt. Die Mischung besteht aus PCR-CO und VIR-CO. Die Virgin-Fasern werden von der Otto bereitgestellt mit einer mittleren Stapellänge von mindestens 19 mm (gemessen per USTER AFIS PRO2). Die Recyclingfasern stammen aus ausgedienten Mietwäscheprodukten der Firma Schwob AG, und weisen eine mittlere Faserlänge von mindestens 10 mm auf. Eine detaillierte Beschreibung der Aufbereitung und Gewinnung der Recyclingfasern erfolgt in Kapitel 2.3.

Die garntechnischen Anforderungen wurden in Abstimmung mit den Industriepartnern festgelegt und orientieren sich an bestehenden Mietwäscheprodukten. Anwendungsbezogene Garnfeinheiten für Kette und Schuss, eine ausreichende Mindestfestigkeit sowie eine angepasste Garndrehung werden definiert, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen mechanischer Belastbarkeit, Saugfähigkeit und Griffqualität sicherzustellen. Die Garngleichmäßigkeit wird als weiterer qualitätsbestimmender Parameter berücksichtigt, da sie maßgeblich die Verarbeitbarkeit und Oberflächenhomogenität beeinflusst. Auf Basis dieser Garnkennwerte werden Gewebestruktur und Fertigungsparameter ausgelegt.

Als Gewebekonstruktion ist ein Walk-Frottier mit marktüblichem Flächengewicht vorgesehen. Die Auslegung der Florparameter erfolgt unter Berücksichtigung von Saugfähigkeit, Haptik und optischer Qualität. Ergänzend wird ein weicher Griff als Qualitätsziel definiert. Die Bewertung erfolgt im Rahmen einer haptischen Prüfung durch geschultes Fachpersonal.

Ziel ist die Entwicklung eines Handtuchs, das den funktionalen und ästhetischen Anforderungen des Mietwäschesektors entspricht und sich in bestehende Produktlinien integriert. Festgelegt sind marktübliche Farbvarianten, Abmessungen sowie konstruktive Merkmale wie Bordüre und belastbare Nahtausführung zur Sicherstellung der Industriewaschbeständigkeit. Die Bewertung der optischen und konfektionstechnischen Qualität erfolgt visuell.

Die definierten Spezifikationen sowie die zugehörigen Prüfmethode dienen als Grundlage für die Qualitätssicherung entlang der gesamten Prozesskette und ermöglichen eine objektive Bewertung der Produkteigenschaften. Eine zusammenfassende Übersicht aller produktbezogenen Anforderungen, Zielwerte und Prüfverfahren sind in Anhang 1 dargestellt.

2.1.2.2 Prozessbezogene Anforderungen

Aufbauend auf dem Anforderungskatalog für das Frottierhandtuch wurden die prozessbezogenen Anforderungen für die Herstellung des Produkts definiert. Diese sind in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zusammengefasst und umfassen sämtliche relevanten Prozessschritte von der Materialbereitstellung bis zur Konfektionierung des Endprodukts.

Wie der Tabelle aus Anhang 2 zu entnehmen ist, beginnt der Herstellungsprozess mit dem Sammeln und Sortieren von insgesamt 1.000 kg Alttextilien, um eine sortenreine Materialbasis aus 100 % CO sicherzustellen. Die erhöhte eingesetzte Materialmenge gegenüber der tatsächlich für die Produktherstellung benötigten Menge ist erforderlich, um umfangreiche Screening- und Vorversuche entlang der Prozesskette durchführen zu können.

Im Reißprozess werden aus der Flächenware spinnfähige Recyclingfasern mit einer mittleren Faserlänge von ≥ 10 mm erzeugt. Die dabei auftretenden Verluste, insbesondere durch Kurzfasern und Staub, sind in Anhang 2 ausgewiesen. Die Reißfasern werden

anschließend im Kardierprozess mit VIR-CO gemischt, gereinigt und parallelisiert. Der Kardierprozess wird in Anhang 2 als zusammengefasster Prozessschritt dargestellt, obwohl er technisch aus mehreren aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten besteht. Diese Bündelung dient der übersichtlichen Darstellung der prozessbezogenen Anforderungen. Im Rahmen der nachfolgenden Lebenszyklusanalyse (Kapitel 2.6) erfolgt eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Teilprozesse. Die Durchmischung der Recycling- und Virginfasern erfolgt zunächst auf dem Krempelwolf, der eine homogene Faserverteilung sicherstellt. Anschließend dient der Vorreiniger der Abscheidung von Staub, Feinanteilen und Kurzfasern, bevor das Fasermaterial auf der Karde gereinigt und parallelisiert und zu einem gleichmäßigen Kardenband geformt wird. Die weitere Homogenisierung erfolgt im Streckprozess, bei dem mittels sechsfach Doublierung und Verstreckung ein gleichmäßiges Streckband erzeugt wird.

Im Spinnprozess wird zunächst ein Vorgarn mit dem Flyer hergestellt. Das Kardenband wird dazu verstreckt und eine definierte Drehung eingebracht. Aus dem Vorgarn wird auf der Ringspinnmaschine ein Garn in unterschiedlichen Feinheiten, abgestimmt auf ihre Funktion im Gewebe (Pol- bzw. Kettfäden oder Schuss), hergestellt. Für das Kettgarn ist ein zusätzlicher Zwirnschritt erforderlich, um die notwendige mechanische Stabilität im Webprozess sicherzustellen. Die Vorbereitung der Kette für den Webprozess erfolgt über Zetteln und Schären, um eine gleichmäßige Parallelisierung, Längengleichheit und eine homogene Fadenspannung der Garne zu erzeugen.

Zur Reduktion von Fadenbrüchen wird das Kettgarn geschlichtet. Im anschließenden Webprozess entsteht ein Walk-Frottier-Polgewebe. Nach der Qualitätskontrolle erfolgt die Ausrüstung durch Stückfärbung, um die optischen und funktionalen Eigenschaften einzustellen.

Den Abschluss bildet die Konfektionierung, bei der die ausgerüstete Ware zugeschnitten und gesäumt wird, sodass gebrauchsfertige Frottierhandtücher gemäß den definierten Produktspezifikationen entstehen.

Insgesamt bilden die definierten Prozessschritte eine durchgängige Herstellungskette von der Bereitstellung der Alttextilien bis zur konfektionierten Frottierware. Die einzelnen Verfahrensstufen sind dabei so aufeinander abgestimmt, dass die für die Produktherstellung erforderlichen Material- und Garnqualitäten erreicht und die in Kapitel 2.1.2.1 festgelegten produktspezifischen Anforderungen erfüllt werden können. Anhang 2 fasst die prozessbezogenen Anforderungen und die zugehörigen Stoffströme zusammen und dient als Grundlage für die nachfolgende Bewertung des Herstellungsprozesses.

Auf Grundlage der in Anhang 2 detailliert dargestellten prozessbezogenen Anforderungen, Spezifikationen und Stoffströme sowie der zuvor definierten produktbezogenen Anforderungen wird im folgenden Kapitel geprüft, inwieweit der entwickelte Herstellungsprozess und das resultierende Frottierhandtuch die festgelegten Anforderungen erfüllen.

2.1.2.3 Prüfung der Produkt- und Prozessanforderungen

Auf Grundlage der produkt- und prozessspezifischen Anforderungen wird im Folgenden geprüft, inwieweit der entwickelte Herstellungsprozess und das resultierende Frottierhandtuch die festgelegten Anforderungen erfüllen.

2.1.2.3.1 Prüfung der Produkthanforderung

Das hergestellte Frottierhandtuch entspricht den im produktbezogenen Anforderungskatalog definierten Kriterien hinsichtlich Konstruktion, Materialzusammensetzung und Gebrauchseigenschaften. Abbildung 1 zeigt das im Projekt hergestellte Handtuch, welches unter Anwendung des definierten Herstellungsprozesses gefertigt wurde. Die erfolgreiche Umsetzung bestätigt die grundsätzliche Eignung des entwickelten Prozesskonzepts zur Herstellung von Frottierhandtüchern unter Verwendung von Recyclingfasern gewonnen aus alten Textilien aus 100 % CO.

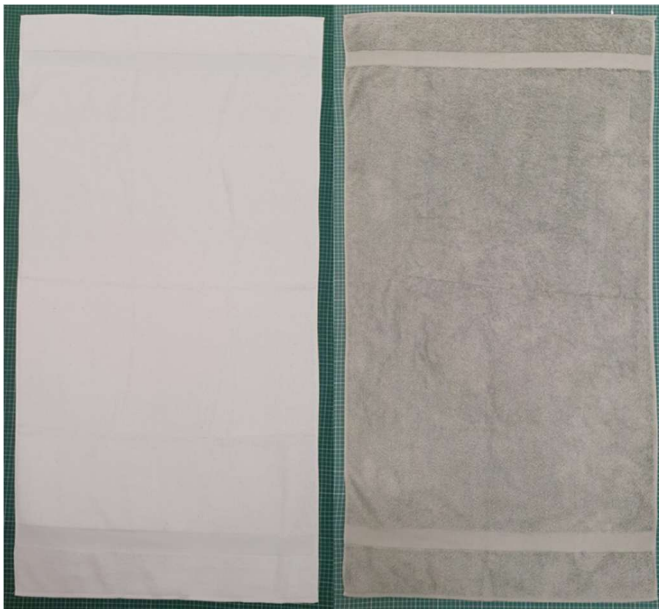


Abbildung 1: ECO YARN Frottierhandtuch

Im Projektverlauf ergaben sich begründete Abweichungen vom ursprünglichen Zielvorhaben des Projektantrags. So wurde das ursprünglich vorgesehene Mischungsverhältnis von Recycling- zu Neufasern von 50 % PCR-CO zu 50 % VIR-CO auf 30 % PCR-CO zu 70 % VIR-CO angepasst. Die Gründe für die Anpassung werden im Kapitel 2.4. detailliert erläutert. Darüber hinaus wurde neben der ursprünglich vorgesehenen weißen Ausführung zusätzlich eine grüne Farbvariante aus dem bestehenden Sortiment der Firma Schwob umgesetzt.

2.1.2.3.2 Prüfung der Prozessanforderungen

Die im Anforderungskatalog für den Herstellungsprozess des Frottierhandtuchs definierten Prozessschritte wurden im Rahmen des Projekts vollständig umgesetzt. Die Sammlung und Sortierung der Alttextilien ermöglichte die Bereitstellung einer sortenreinen Materialbasis aus 100 % CO. Eine Entfernung von Störstoffen war nicht erforderlich, da die eingesetzten Alttextilien, abgesehen von vereinzelt Etiketten, keine relevanten Störstoffe aufwiesen. Diese Etiketten wurden im weiteren Prozess geduldet.

Alle weiteren Prozessschritte von der Faseraufbereitung über die Garnherstellung bis hin zu Weben, Ausrüstung und Konfektionierung wurden entsprechend den definierten Anforderungen durchgeführt. Somit konnte der Herstellungsprozess insgesamt als geeignet zur Umsetzung der definierten Produkthanforderungen bewertet werden. Weitere Details zur Herstellung des Frottierhandtuchs sind in Kapitel 2.5. beschrieben.

2.1.3 Entwicklung und Validierung einer Sortiervorschrift für Miettextilien

Aufbauend auf den definierten produkt- und prozessbezogenen Anforderungen wird im Folgenden eine Sortiervorschrift für Miettextilien entwickelt und hinsichtlich ihrer Anwendung im Projekt überprüft. Ziel ist es, geeignete Ausgangstextilien für die stoffliche Rückführung im betrachteten Herstellungsprozess festzulegen und deren Anwendbarkeit zu überprüfen.

2.1.3.1 Definition der Sortierkriterien

Die Sortiervorschrift legt fest, welche Alttextilien für die stoffliche Rückführung geeignet sind und welche Einschränkungen hierbei gelten. Die definierten Sortierkriterien sind in Tabelle 2: Sortiervorschrift für Miettextilien zur Herstellung von Recyclingfasern zusammengefasst

Tabelle 2: Sortiervorschrift für Miettextilien zur Herstellung von Recyclingfasern

Sortierkriterium	Vorgabe	Anmerkung
Herkunft des Recycling-materials	Post-Consumer	Ausschließlich Miettextilien
Materialzusammensetzung	100 % CO	Geringe Anteil Polyester toleriert bspw. in Form von NÄhten
Textile Konstruktion	Gewebe	-
Lagenanzahl	Einlagig	-
Produktkategorie	Handtücher Bettwäsche Tischwäsche	-
Farbgebung	Weiß	-
Art der Störstoffe	Knöpfe Etiketten	-
Anteil an Störstoffe	Gering	-
Art der Sortierung	Händisch	Visuelle Prüfung

Als Ausgangsmaterial wird ausschließlich PCR-CO aus dem Mietwäschesektor berücksichtigt. Die Herkunft der Textilien ist dabei gezielt auf Miettextilien beschränkt, um die Entstehung eines geschlossenen textilen Kreislaufs zu ermöglichen, bei dem aus nicht mehr gebrauchsfähigen Alttextilien neue textile Produkte hergestellt werden. Hinsichtlich der Faserzusammensetzung werden Textilien aus 100 % CO vorgesehen, wobei geringe Anteile synthetischer Fasern, insbesondere Polyester in Form von Nähfäden, toleriert werden, sofern diese den Recycling- und Weiterverarbeitungsprozess nicht signifikant beeinträchtigen.

Die Sortiervorschrift beschränkt die textile Konstruktion des Ausgangsmaterials auf einlagige Gewebe, da diese eine reproduzierbare Aufbereitung und ein kontrolliertes Aufreißen ermöglichen. Als zulässige Produktkategorien werden Frottierwaren sowie Bett- und Tischwäsche definiert. Sie stellen den dominierenden Anteil der betrachteten Mietwäsche der Firma Schwob dar. Zusätzlich wird die Farbgebung auf weiße Textilien begrenzt, um zusätzliche Entfärbungs- oder Korrekturfärbeschritte im weiteren Prozess zu vermeiden. Störstoffe können in begrenztem Umfang in Form von Knöpfen oder textilen Etiketten auftreten und werden im Rahmen der Sortiervorschrift als zulässig bewertet.

Diese Bestandteile können bei Bedarf im vorgesehenen Prozessschritt der Störstoffentfernung entfernt werden, sodass keine nachteiligen Auswirkungen auf die weitere Aufbereitung zu erwarten sind. Der Anteil an Störstoffen ist insgesamt gering zu halten. Die Sortierung der Alttextilien erfolgt händisch auf Basis einer visuellen Prüfung, um Materialzusammensetzung, Konstruktion und das Vorhandensein möglicher Störstoffe zuverlässig beurteilen zu können.

2.1.3.2 Validierung der Sortiervorschrift

Zur Überprüfung der definierten Sortiervorschrift wird eine Gesamtmenge von 1.000 kg Miettextilien durch das Mietwäscheunternehmen Schwob AG bereitgestellt. Die gesammelten Textilien bestehen ausschließlich aus weißen Frottierwaren sowie Bett- und Tischwäsche und entsprechen damit grundsätzlich den in der Sortiervorschrift definierten Vorgaben hinsichtlich textiler Konstruktion, Lagenzahl, Produktkategorie und Farbgebung. Im Rahmen der Anwendung der Sortiervorschrift zeigt sich, dass keine Störstoffe in Form von Knöpfen oder vergleichbaren festen Bestandteilen vorhanden sind. Lediglich vereinzelt auftretende textile Etiketten werden festgestellt. Diese werden gemäß der definierten Sortiervorschrift geduldet und nicht entfernt, da ihr Auftreten gering ist und keine negativen Auswirkungen auf die nachfolgenden Prozessschritte zu erwarten sind. Eine gesonderte Störstoffentfernung ist daher nicht erforderlich.

Ein Teil der gesammelten Bettwäsche weist eine Faserzusammensetzung von 50 % Baumwolle und 50 % Polyester auf und entspricht damit nicht den definierten Sortierkriterien. Diese Textilien machen etwa ein Viertel der Gesamtmenge aus und werden konsequent aussortiert sowie im weiteren Projektverlauf nicht berücksichtigt. Nach Abschluss der Sortierung verbleibt somit eine finale Materialmenge von rund 750 kg, die den definierten Sortierkriterien entspricht und für den weiteren Einsatz im Recycling- und Herstellungsprozess geeignet ist.

Die Anwendung der Sortiervorschrift bestätigt deren Praxistauglichkeit und Umsetzbarkeit. Die definierten Kriterien ermöglichen eine eindeutige Auswahl geeigneter Miettextilien und stellen eine belastbare Grundlage für die weitere Verarbeitung im Projekt dar.

2.1.3.3 Zusammenfassende Bewertung der Sortiervorschrift

Die entwickelte Sortiervorschrift wurde gemeinschaftlich durch das Projektkonsortium erarbeitet und bildet eine belastbare Grundlage für die Sammlung und Auswahl geeigneter Miettextilien zur stofflichen Rückführung. Im Vergleich zum ursprünglichen Projektantrag, in dem ausschließlich die Sammlung von Handtüchern vorgesehen war, wurde der Geltungsbereich der Sortiervorschrift auf weitere textile Produktkategorien erweitert, um eine ausreichende Materialbasis sicherzustellen. Diese Anpassung erwies sich als notwendig, da die verfügbare Menge an ausgedienten Handtüchern allein nicht ausreichte, um die vorgesehenen Untersuchungen durchzuführen.

2.1.4 Fazit Arbeitspaket 1: Spezifizierung der Anforderungen

Als Ergebnis des Arbeitspakets 1 liegen zwei eigenständige Anforderungskataloge vor: ein produktbezogener Anforderungskatalog für das Frottiertuch sowie ein darauf abgestimmter prozessbezogener Anforderungskatalog für dessen Herstellung unter Verwendung von Recyclingfasern. Beide Kataloge definieren die relevanten Qualitätsparameter und Randbedingungen für Ein- und Ausgangsmaterialien entlang der betrachteten Prozesskette und bilden die Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen. Ergänzend wurde eine praxisnahe Sortiervorschrift für nicht mehr gebrauchsfähige Miettextilien erarbeitet, die sich an den definierten Produkt- und Prozessanforderungen orientiert. Die Anwendung und Überprüfung der Sortiervorschrift bestätigt deren Umsetzbarkeit und ermöglicht die gezielte Bereitstellung geeigneter Ausgangsmaterialien für die weiteren Prozessschritte.

Damit schafft Arbeitspaket 1 sowohl eine klare anforderungsseitige Strukturierung als auch eine praktisch validierte Ausgangsbasis für die folgenden Arbeitspakete und stellt eine zentrale Voraussetzung für die weitere Bewertung der technischen Umsetzbarkeit und der qualitativen Eigenschaften des betrachteten Recyclingansatzes dar.

2.2 Arbeitspaket 2: Aufbereitung der Textilien

Ziel des Arbeitspakets 2 ist die Entwicklung eines effizienten Vorbereitungsprozesses für Alttextilien, um störstofffreie Textilien in einer für die Folgeprozesse geeigneten Form bereitzustellen. Im Fokus stehen dabei sowohl die potenzielle Entfernung von Störstoffen wie Knöpfen, Reißverschlüssen oder Etiketten als auch die Reduktion der Textilien auf definierte Schnittgrößen (40 x 40 mm, 100 x 100 mm), die eine nachfolgende mechanische Aufbereitung ermöglichen. Die Bearbeitung der Textilien erfolgt in der Modellwerkstatt Recycling Atelier der THA. Für die Aufbereitung werden verschiedene Trenntechniken betrachtet, darunter manuelles Schneiden, Stanzen sowie mechanisches Trennen mittels Guillotine. Diese Verfahren sollen hinsichtlich ihrer industriellen Tauglichkeit, ihres Durchsatzes sowie ihrer Reproduzierbarkeit bewertet werden, um einen wirtschaftlich und ökologisch effizienten Prozess zur Bereitstellung von PCR-CO für die nachfolgenden Prozessschritte abzuleiten. Neben den aufbereiteten Textilien ist die Dokumentation des erarbeiteten Prozesses in Form eines Leitfadens zum Know-how-Transfer vorgesehen.

2.2.1 Bewertung der Trenntechnik und Ableitung des Aufbereitungsprozesses

Zur qualitativen Einordnung manueller Trennverfahren werden praxisnahe Erprobungen mit manuellem Schneiden sowie Stanzen durchgeführt. Die Aufbereitungsschritte erfolgen exemplarisch manuell und dienen nicht dem quantitativen Vergleich der Verfahren,

sondern der Abschätzung des zeitlichen Aufwands sowie der praktischen Handhabbarkeit in Abhängigkeit von Materialart und Schnittgröße. Betrachtet wurden dabei unterschiedliche textile Konstruktionen (Bettwäsche und Frottierwaren) sowie zwei definierte Schnittgrößen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der zeitliche Aufwand manueller Verfahren stark von der textilen Konstruktion abhängt. Insbesondere bei Frottierwaren ist im Vergleich zu glatten Geweben wie Bettwäsche ein deutlich höherer und kraftaufwendiger Bearbeitungsaufwand vor allem beim Schneiden mittels Rollmesser zu beobachten. Die Messer des Arbeitswerkzeuges stumpften schnell ab und die Polschlingen des Gewebes sorgen für ein erhöhtes Flächenvolumen und schlechteres Durchgleiten des Textils. Es bedarf eines regelmäßigen Wechsels der Klinge auf Grund schnellen Abstumpfens. Zudem wird eine hohe Abhängigkeit vom Bediener festgestellt. Aufgrund dieser Eigenschaften sind manuelle Verfahren für die Aufbereitung größerer Materialmengen nur eingeschränkt geeignet.

Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse sowie aus technischen Erwägungen wird auf einen systematischen experimentellen Vergleich aller Trenntechniken verzichtet. Stattdessen wird ein mechanisches Schneidverfahren mittels Guillotinen-Schneidmaschine als geeignet bewertet. Für die Aufbereitung kam eine Guillotinen-Schneidmaschine Pierret CT-60 von der Firma Pierret, Corbion, Belgien, zum Einsatz, die einen Durchsatz von etwa 12,5 kg/h (Herstellerangabe) erreicht und reproduzierbare Schnittgrößen gewährleisten sowie industriell skalierbar ist. Damit bieten Guillotinen-Schneidmaschinen gegenüber manuellen Verfahren entscheidende Vorteile hinsichtlich Effizienz, Prozessstabilität und Praxistauglichkeit.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden abschließend in Tabelle dokumentiert und dienen dem Know-how-Transfer sowie der Übertragbarkeit des Prozesses auf weitere Anwendungsfälle.

Tabelle 3: Praxisnahe Bewertung verschiedener Trenntechniken im Rahmen der textilen Aufbereitung

Trenntechnik	Merkmale	Gleichmäßigkeit der Schnittgrößen	Störstoffentfernung	Durchsatz	Eignung
Manuelles Schneiden	Manuell mittels Rollmesser Bedienerabhängig	Mittel	Geeignet	Gering	Eingeschränkt
Stanzen	Manuell unterstütztes Stanzverfahren	Hoch	Eingeschränkt	Gering	Eingeschränkt
Guillotine	Mechanisch	Gering	Eingeschränkt	Hoch	Geeignet

2.2.2 Auswahl und Umsetzung des Aufbereitungsverfahrens

Auf Basis dieser Bewertung wurde die Guillotinen-Schneidmaschine als zentrales Element des Aufbereitungsprozesses eingesetzt. Der entwickelte Prozess ermöglicht die Bereitstellung geschnittener Textilien in ausreichender Qualität für die nachfolgenden Recyclingprozesse. Eine Entfernung von Störstoffen war für das im Projekt eingesetzte Untersuchungsmaterial nicht erforderlich, da die bereitgestellten Alttextilien keine Knöpfe, Reißverschlüsse oder Etiketten aufwiesen. Dadurch konnte der Aufbereitungsprozess vereinfacht und auf die Reduktion der Textilien auf geeignete Schnittgrößen fokussiert werden.

2.3 Arbeitspaket 3: Evaluierung des Reißprozesses

Die Qualität der aus Alttextilien gewonnenen Recyclingfasern stellt eine zentrale Voraussetzung für die Herstellung leistungsfähiger Garne dar. Insbesondere die Faserlänge beeinflusst maßgeblich die Garnfestigkeit und damit die Gebrauchstauglichkeit des Endproduktes. Ziel des Arbeitspaketes 3 ist die Optimierung des Reißprozesses, um Stapelfasern mit maximal möglicher Faserlänge bei gleichzeitig hoher Prozesseffizienz zu erzeugen. Hierzu werden zentrale Prozessparameter systematisch untersucht und hin-

sichtlich ihres Einflusses auf Faseraufschluss, Faserschädigung und resultierende Faserlängenverteilung bewertet. Ziel ist die Definition eines prozessstabilen und fasererhaltenden Öffnungsprozesses als Grundlage für die nachfolgenden Spinnprozesse.

2.3.1 Definition der Reißfaserqualität

Die Reißfaserqualität beschreibt die Eignung der durch den mechanischen Reißprozess aus Alttextilien gewonnenen Stapelfasern für die Weiterverarbeitung in der Spinnereivorbereitung. Sie stellt eine zentrale Voraussetzung für die Spinnfähigkeit der Fasern sowie für die Erzielung ausreichender Garnfestigkeiten und reproduzierbarer Prozesseigenschaften dar.

Entscheidend für die Bewertung der Reißfaserqualität sind insbesondere die Faserlängenverteilung, charakterisiert durch die mittlere Faserlänge $L(n)$ sowie den Kurzfaserteil, ferner der Auflösegrad des Materials, der Abfallanteil (Trash/Waste) sowie der Anteil an Staub-, Fein- und Nissenfraktionen. Diese Parameter beeinflussen maßgeblich die Garnfestigkeit, die Gleichmäßigkeit der Garne, die Prozessstabilität in Karde und Strecke sowie die Ressourceneffizienz des gesamten Recyclingprozesses [UST25] [SCHW22] [Kär25].

Für mechanisch recycelte Fasern existiert bislang weder ein allgemein anerkannter Standard noch eine normierte Prüfmethode zur ganzheitlichen Bewertung der Reißfaserqualität. Zwar werden Prüfmethode aus der Virginfaserprüfung, insbesondere aus der Baumwollprüfung, teilweise adaptiert, jedoch sind diese aufgrund der spezifischen Eigenschaften mechanisch recycelter Fasern nur eingeschränkt geeignet [SCHW22] [UST25]. Herausforderungen ergeben sich insbesondere durch den hohen Anteil kurzer Fasern, durch Garn- und Gewebereste, durch Mischfasern sowie durch gefärbte und unterschiedlich vorgeschädigte Fasern, welche die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse erheblich beeinträchtigen [SCHW22] [Kär25].

Zur Bestimmung der Faserlängenverteilung und des Kurzfaserteils wird das Einzelfasermesssystem Uster AFIS Pro 2 der Firma Uster AG, Uster, Schweiz eingesetzt. Dadurch wird eine praxisnahe, reproduzierbare und materialangepasste Bewertung der Reißfaserqualität ermöglicht, die sowohl die fasertechnischen als auch die prozesstechnischen Anforderungen des mechanischen Textilrecyclings berücksichtigt und als Grundlage für die nachfolgenden Arbeitspakete dient.

2.3.2 Methodisches Vorgehen zur Optimierung der Reißfaserqualität

Zur Optimierung der Reißfaserqualität wird ein zweistufiges Vorgehen gewählt, bestehend aus Screening-Versuchen zur Identifikation relevanter Einflussgrößen und darauf aufbauenden Optimierungsversuchen zur Ableitung produktionstauglicher Prozesseinstellungen. Die Versuche wurden auf einer Omni mini RecoLine von der Firma Omni, Prato, Italien, im Recycling Atelier Augsburg der technischen Hochschule Augsburg durchgeführt.

2.3.3 Screening der Prozessparameter (Plackett-Burman)

Im Screening werden die Einflüsse zentraler Maschinen- und Prozessparameter auf die Reißfaserqualität untersucht. Hierzu wird ein Plackett-Burman-Versuchsplan mit zehn Faktoren auf jeweils zwei Stufen in insgesamt zwölf Versuchen eingesetzt. Dieses Versuchsdesign zeichnet sich durch eine hohe Versuchseffizienz bei minimalem experimentellem Aufwand aus und eignet sich insbesondere für Screening-Untersuchungen zur Identifikation signifikanter Haupteffekte. Durch die orthogonale Versuchsstruktur können die Einflüsse der einzelnen Faktoren unabhängig voneinander abgeschätzt werden, wodurch eine fundierte Priorisierung relevanter Prozessparameter für weiterführende Untersuchungen ermöglicht wird. Der Versuchsplan wird auf zwei unterschiedliche Materialien aus der Mietwäsche angewendet, um den Einfluss der textilen Struktur und des Materialaufbaus auf den Reißprozess zu untersuchen. Bei den untersuchten Materialien handelt es sich um Bettwäsche und Frottierhandtücher aus der Mietwäsche. Beide Materialien bestehen aus 100 % Baumwolle und liegen als Post-Consumer-Textilien vor.

Die untersuchten Faktoren der Screening-Versuche umfassen:

1. Schnittgröße des Eingangsmaterials
2. Einzugsdruck
3. Drehzahl von Tambour 1 und Tambour 2
4. Drehzahl der Arbeiterwalzen
5. Abstand der Arbeiterwalzen zum Tambour
6. Anzahl der Tamboure
7. Übertragungsgeschwindigkeit
8. Messerabstand

Die Anzahl der Tamboure wird durch mehrfaches Durchlaufen der Reißmaschine realisiert. Zwei Durchläufe entsprechen einer Tambouranzahl von vier, vier Durchläufe einer Tambouranzahl von acht. Die Drehzahl der Arbeiter bezieht sich jeweils auf alle vier Arbeiterwalzen einer Einheit. Der Abstand der Walzen beschreibt den Abstand der Arbeiterwalzen zum jeweiligen Tambour und wird binär als enger bzw. weiter Abstand codiert. Die beiden Messer werden gemeinsam verstellt.

Da Versuche mit einem Messerabstand von 90 mm bei allen Durchläufen aufgrund einer zu großen Menge nicht ausreichend aufgelöster Textilstücke nicht auswertbar sind, wird der Messerabstand im letzten Durchlauf auf 60 mm reduziert. Die Übertragungsgeschwindigkeit wird über eine Kombination aus vier Maschineneinstellungen (Kondensator 1, Kondensator 2, Einzug 1 und Einzug 2) variiert und im Versuchsplan als niedrige bzw. hohe Übertragungsgeschwindigkeit abgebildet. Der Versuchsplan ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Plackett-Burmann Screeningversuchsplan ECO YARN

Versuchs Nr.	Bettwäsche/Handtücher	Schnittgröße [mm]	Anzahl Tamboure	Abstand Walzen	Druck Einzug [Bar]	Geschw. Tambour 1 [U/min]	Geschw. Arbeiter 1 [U/min]	Geschw. Tambour 2 [U/min]	Geschw. Arbeiter 2 [U/min]	Übertragungs-geschw.	Messer [mm]
B1	H1	100	4	1	9	1400	12	1400	4	-1	90,60
B2	H2	100	8	1	5	2400	12	1400	12	-1	40,40
B3	H3	40	8	1	5	2400	4	1400	4	1	90,60
B4	H4	40	4	1	9	2400	4	2400	12	-1	90,60
B5	H5	100	4	1	5	1400	4	2400	12	1	40,40
B6	H6	40	8	1	9	1400	12	2400	4	1	40,40
B7	H7	100	8	0	9	2400	4	2400	4	-1	40,40
B8	H8	40	4	0	9	2400	12	1400	12	1	40,40
B9	H9	100	8	0	9	1400	4	1400	12	1	90,60
B10	H10	100	4	0	5	2400	12	2400	4	1	90,60
B11	H11	40	4	0	5	1400	4	1400	4	-1	40,40
B12	H12	40	8	0	5	1400	12	2400	12	-1	90,60

Auswertung Bettwäsche

Die Ergebnisse der Faserlängenmessungen des Materials Bettwäsche weisen eine mittlere Faserlänge $L(n)$ im Bereich von 8,85 mm bis 10,96 mm auf. Zwischen den einzelnen Versuchswegen treten teilweise Unterschiede auf (vgl. Abbildung 2).

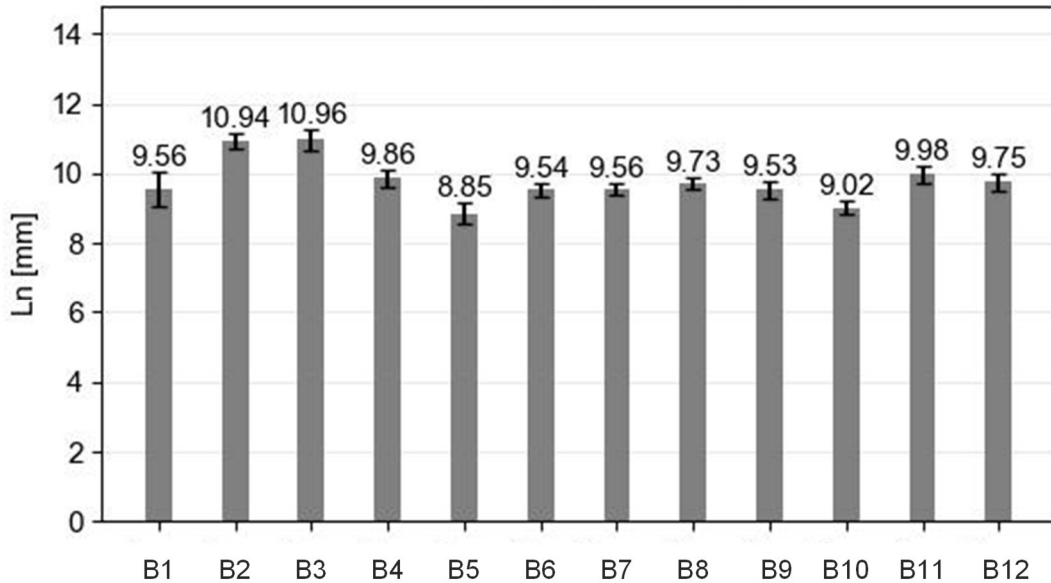


Abbildung 2: Mittlere Faserlänge per number $L(n)$ des Plackett Burmann Versuchsplan-Bettwäsche

Die statistische Auswertung des Versuchsplans zeigt, dass kein untersuchter Faktor statistisch signifikant ist. Dennoch lassen sich klare Tendenzen erkennen. Den größten Einfluss auf die mittlere Faserlänge zeigt die Drehzahl von Tambour 2, wobei eine höhere Tambourdrehzahl tendenziell zu höheren Faserlängen führt. Ebenso wirkt sich eine erhöhte Anzahl an Tambouren positiv auf die Faserlänge aus.

Die Auswertung des Plackett-Burman-Versuchsplans ist in Abbildung 3 dargestellt. Keiner der untersuchten Effekte weist eine statistische Signifikanz auf. Dennoch lassen sich aus den standardisierten Effekten klare Tendenzen ableiten. Den größten Einfluss auf die mittlere Faserlänge zeigt die Drehzahl des zweiten Tambours, wobei eine erhöhte Tambourdrehzahl mit einer Zunahme der Faserlänge einhergeht. Ebenso wirkt sich eine erhöhte Anzahl an Tambouren positiv auf die mittlere Faserlänge aus. Diese identifizierten Tendenzen werden in der nachfolgenden Optimierungsphase gezielt berücksichtigt.

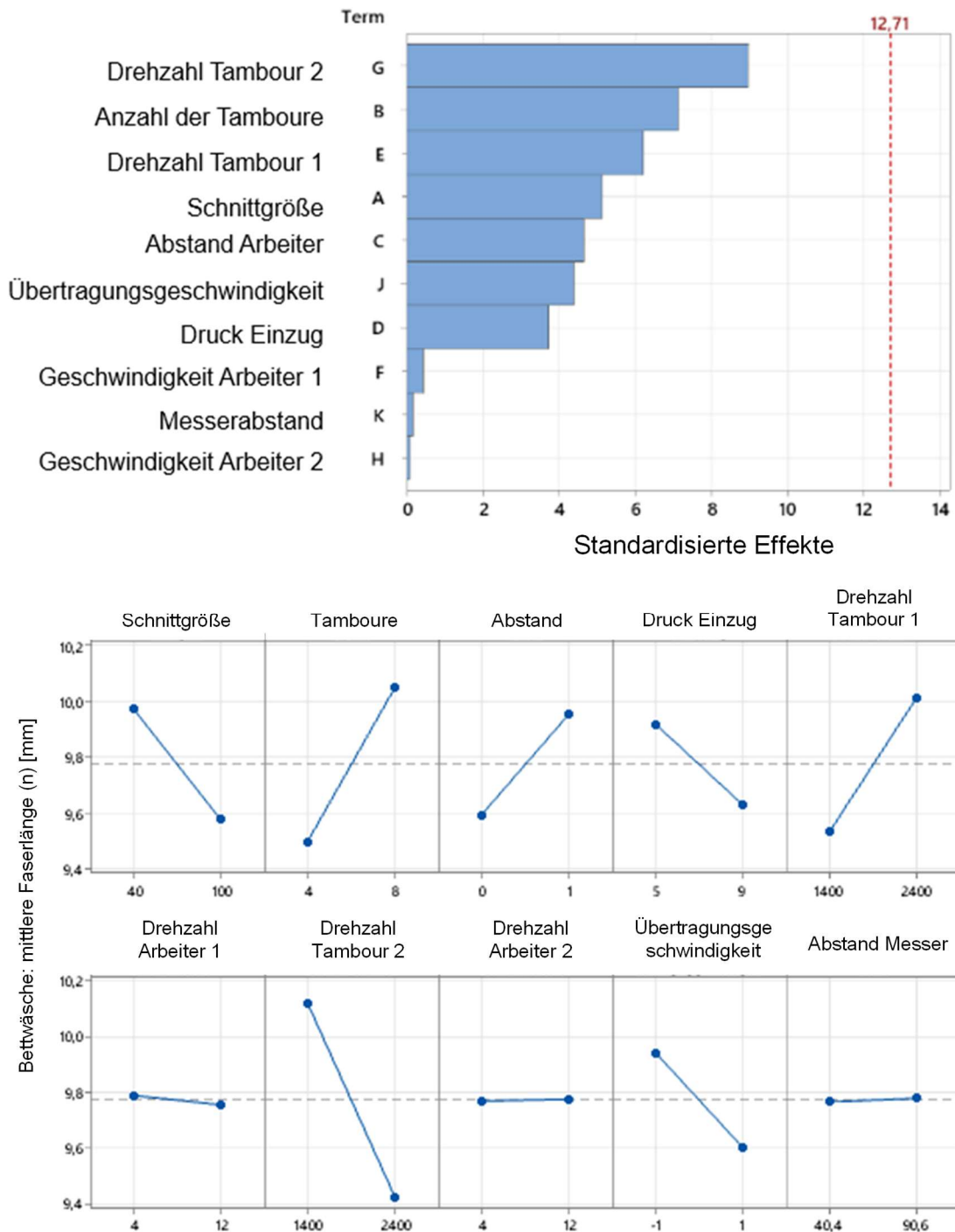


Abbildung 3: Standardisierte Effekte Plackett-Burmann L(n) Bettwäsche

Auswertung Frottier Handtücher

Bei den Versuchen mit Frottierhandtüchern treten ausgeprägte prozesstechnische Probleme auf. Diese äußern sich insbesondere in einem Aufreißen der Textilien, wiederholten Verstopfungen der Reißmaschine sowie in einem unzureichenden Auflösegrad des Ma-

terials. Als wesentliche Ursachen werden materialspezifische Eigenschaften der Frot-tierhandtücher identifiziert, insbesondere Kantenverstärkungen und Bordüren, lokal erhöhte Materialdichten sowie die insgesamt hohe Gewebefestigkeit der Frottierstruktur.

Abbildung 4 veranschaulicht exemplarisch diese Problematik. Es ist erkennbar, dass sich nicht ausreichend aufgelöste Textilstücke in der Garnitur des Tambours absetzen und dort zu Materialstauungen führen. Diese Ablagerungen beeinträchtigen die kontinuierliche Materialführung und resultieren in instabilen Prozessbedingungen.

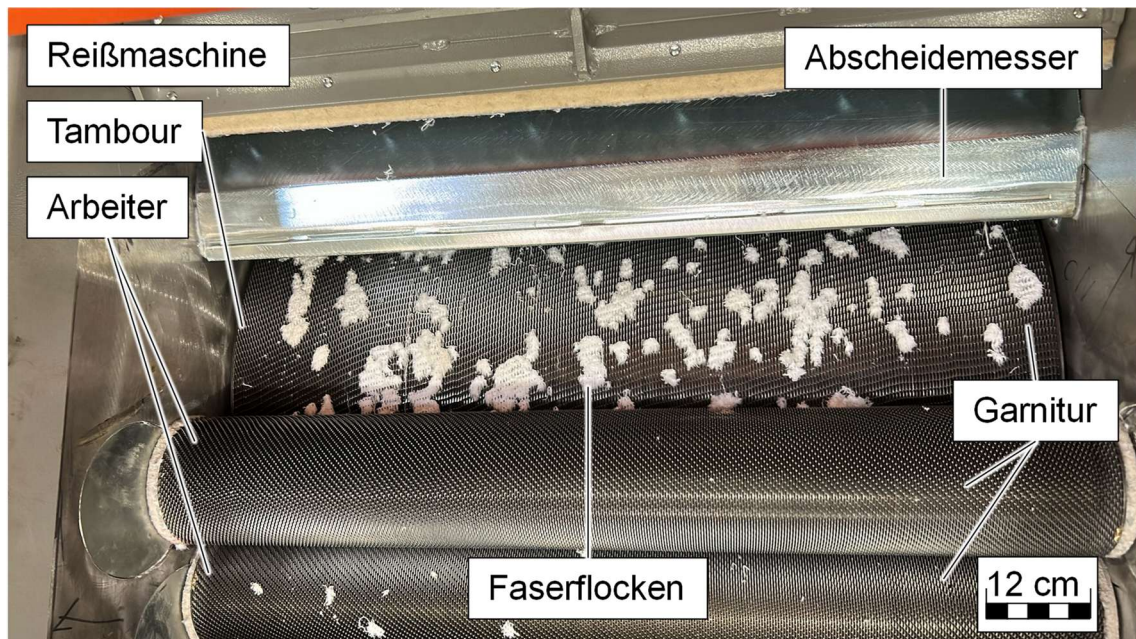


Abbildung 4: Probleme bei Produktion mit Handtüchern

Als möglicher technischer Lösungsansatz wird grundsätzlich eine erhöhte Anzahl an Durchläufen mit grober Garnitur zur verbesserten Auflösung der festen Strukturelemente abgeleitet. Eine entsprechende Anpassung der Garnituren ist jedoch im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht vorgesehen und kann daher nicht umgesetzt werden.

Diese Problematiken spiegeln sich ebenfalls in einer geringeren Qualität wider (Faserlängen zwischen 7,0 mm und 9,55 mm). Aufgrund der erheblichen Schwierigkeiten im Prozess und der geringen Unterschiede lassen sich weder signifikante Einflüsse der Parameter noch klare Tendenzen ableiten. Dies wird auch in Abbildung 5 deutlich, die sowohl das Pareto-Diagramm der standardisierten Effekte als auch das Haupteffektdiagramm zeigt. Im Pareto-Diagramm überschreitet keiner der untersuchten Faktoren die Signifikanzgrenze, was darauf hinweist, dass kein Parameter einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Zielgröße hat. Auch die Haupteffektdiagramme zeigen zwar teilweise leichte Trends, diese fallen jedoch insgesamt gering aus und bestätigen, dass keine klaren oder dominanten Einflüsse einzelner Parameter identifiziert werden können.

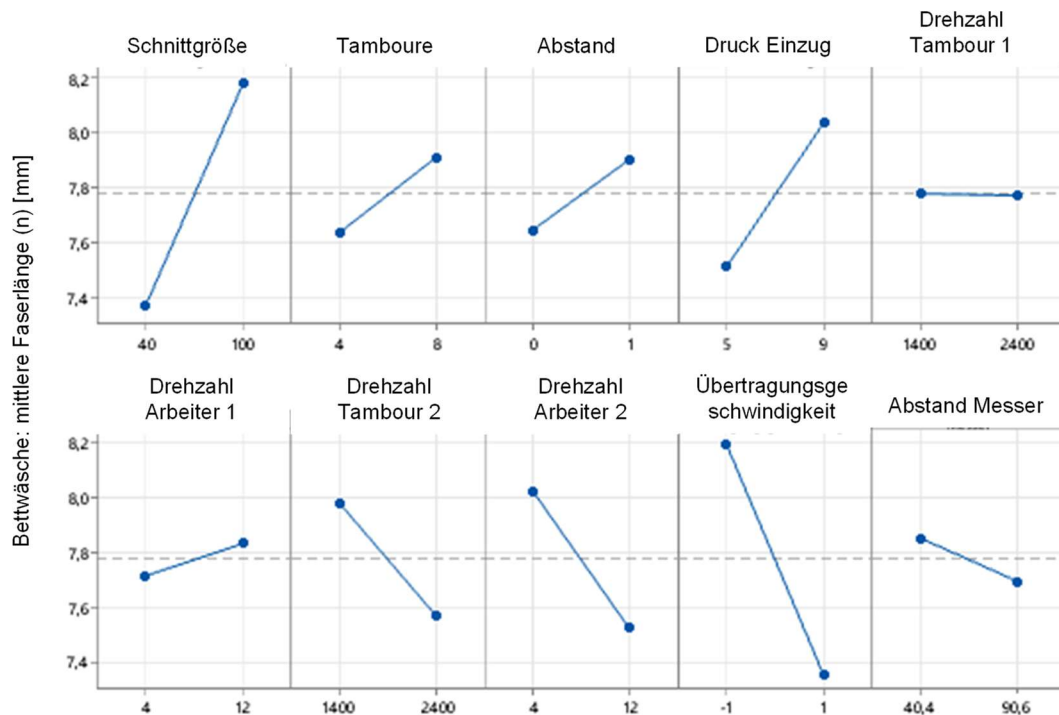
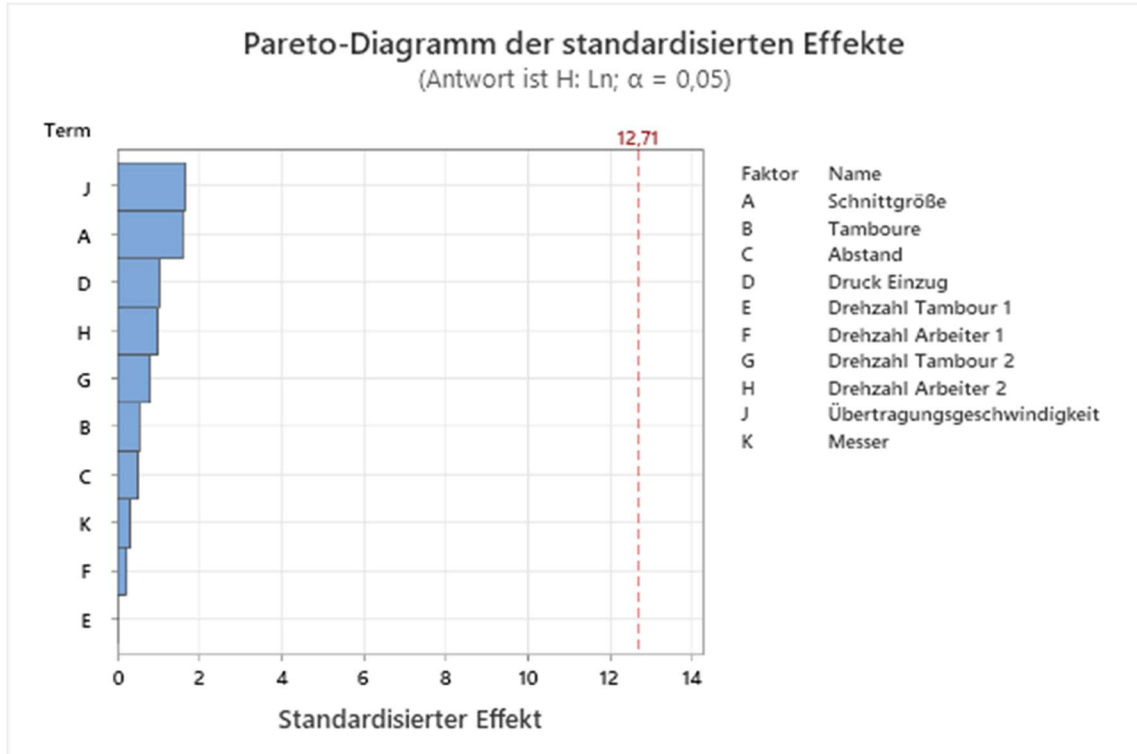


Abbildung 5: Standardisierte Effekte Placket Burmann L(n) Handtücher

Vor diesem Hintergrund sowie aufgrund der insgesamt eingeschränkten Prozessstabilität und fehlenden Produktionstauglichkeit des Materials wird im weiteren Projektverlauf entschieden, die Optimierungsarbeiten ausschließlich mit dem Material der Bettwäsche fortzuführen.

Ableitung optimierter Einstellungen

Auf Basis der Screening-Ergebnisse werden Parameter mit geringem Einfluss ausgeschlossen und gezielte Parameterkombinationen für die Optimierungsphase definiert. Neben der technischen Optimierung werden ökologische Aspekte, insbesondere die Materialeffizienz und die Reduzierung des Abfallanteils, sowie ökonomische Aspekte wie Durchsatz und Prozessstabilität berücksichtigt. Ziel ist eine stabile und produktionstaugliche Prozessführung.

Die Optimierungsversuche umfassen unter anderem eine Variation der Drehzahl von Tambour 1, eine Erhöhung der Anzahl der Durchläufe, eine Reduzierung der Schnittgröße, größere Walzenabstände, reduzierte Übertragungsgeschwindigkeiten sowie einen geringeren Einzugsdruck. Die Auswertung zeigt, dass die mittlere Faserlänge durch die Optimierungsmaßnahmen insgesamt stabil gehalten wird, obwohl der Fokus der Versuche auf der Reduzierung des Abfallanteils liegt. Im Vergleich zu den Screening-Versuchen wird ein günstigeres Verhältnis zwischen Faserlänge und Materialverlust erzielt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass durch gezielte Parameteranpassungen sowohl die Reißfaserqualität als auch die Materialausbeute verbessert werden, wobei der Einfluss stark vom jeweiligen Eingangsmaterial abhängt.

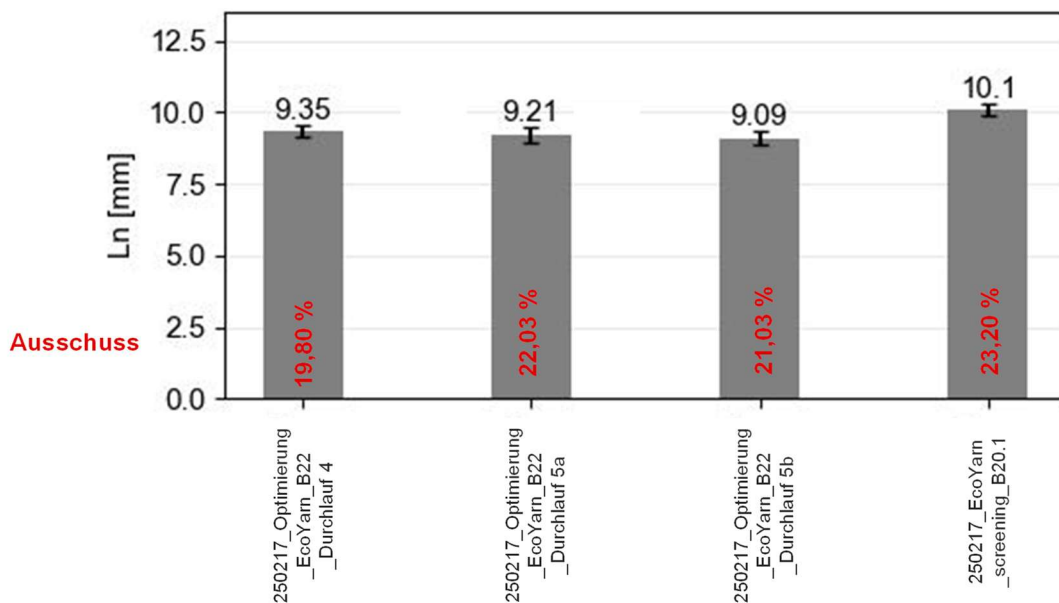


Abbildung 6: Mittlere Faserlänge L(n) per number für die Optimierungsversuche der Bettwäsche

2.3.4 Vergleich des Referenzprozesses recot²®

Die im Projekt produzierten ECO YARN-Reißfasern auf Basis von PCR-CO wurden mit dem etablierten recot²®-Garn der Firma Otto verglichen. Beim recot²®-Prozess handelt es sich um ein seit mehreren Jahren erfolgreich am Markt eingesetztes Recyclinggarn,

das aus einer Mischung von Bio-Baumwolle und PIR-CO hergestellt wird. Das eingesetzte Post-Industrial-Material stammt aus Produktionsabfällen in Form unbehandelter Garne, die einer mechanischen Aufbereitung unterzogen werden.

Zur Sicherstellung einer vergleichbaren und reproduzierbaren Bewertung wurden beide Reißfaserkategorien unter identischen Bedingungen mit dem AFIS PRO 2 der Firma Uster Technologies AG analysiert. Die für die Beurteilung der Faserqualität relevanten Parameter sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den ECO YARN-Reißfasern und den Post-Industrial-Reißfasern des recot²-Prozesses. Die ECO YARN-Reißfasern weisen eine signifikant reduzierte mittlere Faserlänge $L(n)$ von 10,1 mm auf, während für das recot²-Material ein Wert von 14,5 mm ermittelt wird. Diese Beobachtung bestätigt die in Arbeitspaket 1 angenommene und dort dargestellte grundsätzliche Differenzierung der Faserlängen zwischen PCR-CO- und PIR-CO (vgl. Tabelle 1). Korrespondierend zur geringeren mittleren Faserlänge zeigt sich bei den ECO YARN-Reißfasern ein erhöhter Kurzfasernanteil $SFC(n)$ von 68,2 %, während der Kurzfasernanteil beim recot²-Material bei 43,3 % liegt. Auch die Kenngröße $L(n) 5\%$ verdeutlicht diesen Trend: Die unteren 5 % der Faserlängen liegen bei den ECO YARN-Reißfasern bei 21,4 mm und somit unter dem Wert des recot²-Materials von 29 mm. Diese Ergebnisse weisen auf einen höheren Grad an Faserverkürzung infolge der Nutzung und der damit verbundenen mechanischen Beanspruchung der Post-Consumer-Textilien hin. Darüber hinaus zeigen sich Unterschiede hinsichtlich der Verunreinigungen. Die ECO YARN-Reißfasern weisen eine deutlich höhere Anzahl an Trash- und Dust-Partikeln auf. Insbesondere der TrashCount ist mit 838 cnt/g im Vergleich zu 12 cnt/g beim recot²-Material signifikant erhöht. Gleichzeitig liegt die mittlere Größe der detektierten Verunreinigungen (TotalTrashSize und DustMeanSize) in einer vergleichbaren Größenordnung. Die erhöhte Partikelanzahl der ECO YARN-Reißfasern könnte auf den Post-Consumer-Ursprung des Materials sowie auf Einflüsse aus Nutzung, Waschzyklen und textiler Ausrüstung zurückzuführen sein. Zusätzlich könnte der geringere Öffnungsgrad des Materials, erkennbar an verbliebenen Flächen- und Garnfragmenten, im Gegensatz zu den stärker vereinzelt Fasern des Vergleichsmaterials, einen erhöhten TrashCount begünstigen.

Tabelle 5: AFIS PRO 2 basierte Faserkennwerte der ECO YARN-Reißfasern (PCR) im Vergleich zu recot²-Reißfasern (PIR)

Experiment	PCR-CO (B20.1)	PIR-CO (recot®)
L (n) [mm]	10,1	14,5
SFC (n) [%]	68,2	43,3
L (n) 5% [mm]	21,4	29
UQL (w) [mm]	17,6	24,4
TrashCount [cnt/g]	838	12
TotalTrashSize [µm]	1499	1688
DustCount [cnt/g]	193	32
DustMeanSize [µm]	149	160

Zur übersichtlichen Gegenüberstellung der wesentlichen Faserkennwerte zeigt Abbildung 7 die normierten AFIS-Parameter beider Reißfaserkategorien in Form eines Spinnendiagramms. Das Diagramm verdeutlicht insbesondere die gegenläufige Ausprägung von Trash- und Dust-Gehalt bei PCR-CO gegenüber PIR-CO.

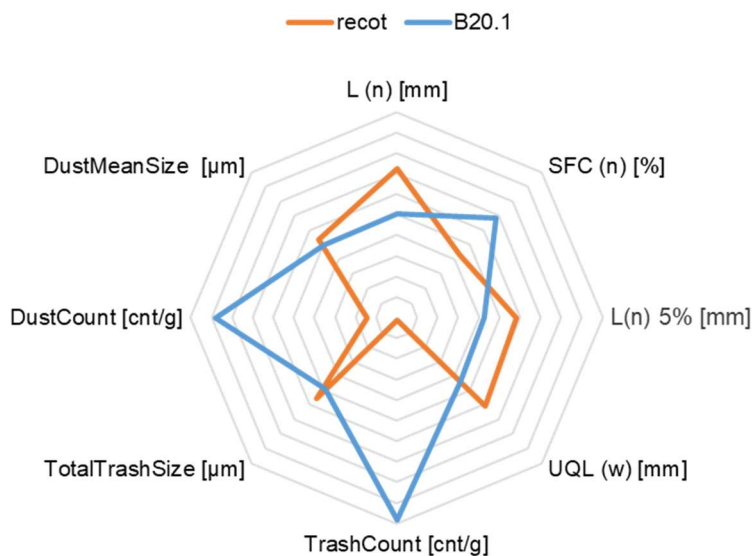


Abbildung 7: Multidimensionale Gegenüberstellung der AFIS-Faserparameter von ECO YARN- und recot²-Reißfasern

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass sich Post-Consumer- und Post-Industrial-Recyclingmaterial deutlich hinsichtlich ihrer Faserlängenverteilung, des Kurzfaserteils sowie des Verunreinigungsgrades unterscheiden. Während PIR-CO aus Produktionsabfällen eine vergleichsweise höhere Faserqualität aufweist, stellen ECO YARN-Reißfasern aus PCR-CO erhöhte Anforderungen an die nachfolgenden Prozessschritte.

2.3.5 Zusammenfassung und Bewertung

Die im Rahmen von Arbeitspaket 3 durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass durch eine systematische Analyse und gezielte Optimierung des Reißprozesses ein ausgewogener Kompromiss zwischen Faserqualität, Prozesseffizienz und Materialausbeute erzielt werden kann. Trotz der materialbedingt begrenzten Faserlängen von PCO-CO konnten stabile, produktionstaugliche Prozesseinstellungen abgeleitet werden, die eine Weiterverarbeitung der Reißfasern in der Spinnereivorbereitung ermöglichen.

Arbeitspaket 3 leistet einen wesentlichen Beitrag zur Ressourceneffizienz des Gesamtprozesses und zur Erreichung des Projektziels, ein hochwertiges Ringgarn mit hohem Anteil an PCO-CO herzustellen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die zentrale Grundlage für die nachfolgenden Arbeitspakete und sind grundsätzlich auf industrielle Maßstäbe übertragbar.

Abschließend ist festzustellen, dass die Reißfasern der gewählten Herkunft aufgrund der hohen Belastungen der ersten Lebensphase im Mietwäschebereich eine deutliche Beanspruchung aufweisen. Die mittlere Faserlänge der Reißfasern liegt mit 10,1 mm bei weniger als 50 % der Faserlänge von VIR-CO und 66 % der Länge von PIR-CO. Die geringe Faserlänge wird erhebliche Auswirkungen auf die nachgelagerte Prozesskette von Spinnereivorbereitung bis hin zur Produktherstellung haben. Die geringe Faserlänge war bei Antragsstellung in der Form nicht erwartet worden, weshalb Anpassungen der Projektziele erforderlich sind.

Das Arbeitspaket erforderte einen erhöhten Ressourceneinsatz, der im Projektplan nicht vorgesehen war. Da dieser Schritt die entscheidende Stellgröße der Faserlänge betrifft wurde vom Konsortium entschieden, hier zusätzliche Ressourcen einzusetzen und dafür die nachgelagerten Prozess in geringerem Maße zu betrachten und ggf. in weiterführenden Projekten einen verstärkten Fokus zu setzen.

2.4 Arbeitspaket 4: Untersuchung der Spinnereivorbereitung und Spinnerei

Das angestrebte Ziel des Arbeitspakets 4 ist die Entwicklung von Ringgarnen in den Feinheiten Nm 27/1 und Nm 41/2 mit einem Recyclinganteil von mindestens 50 % PCR-CO, unter gleichzeitiger Sicherstellung der Garnqualität in Bezug auf die definierten Anforderungen aus Kapitel 2.1. Grundlage hierfür war die Optimierung der Prozessschritte der Spinnereivorbereitung und des Ringspinnprozesses, um den speziellen Anforderungen recycelter Fasern gerecht zu werden. Aufgrund der geringen Faserlänge der Reißfasern, die in Arbeitspaket 3 ausführlich beschrieben werden, musste das ursprüngliche Ziel von mindestens 50 % Rezyklatanteil angepasst werden. Endgültig wurden Ringgarne mit 30 % PCR-CO in Nm 27/1 und Nm 41/2 hergestellt. Das Arbeitspaket konnte teilweise erfüllt werden. Gleichzeitig wurden wichtige Erkenntnisse gesammelt, welche

Parameter und Lösungsansätze zu einer deutlichen Erhöhung des Rezyklatanteils führen könnten.

2.4.1 Materialauswahl und Eigenschaften

Das Material für die Versuchsdurchführung besteht zum einen aus PCR-CO aus ausgeleierter Mietwäsche und VIR-CO als Trägerfaser. Die PCR-CO ist das Material B20.1 aus AP3. Die VIR-CO ist ein Standardprodukt der Firma Otto und wird als Kardenband zur Verfügung gestellt. Das vorherige Kardieren erfolgt, um eine möglichst konstante Qualität der Faserverteilung, Faserlänge sowie Trashgehalt und Nissenanzahl in der Trägerfaser zu gewährleisten. Damit sollen Auswirkungen der Versuchsdurchführung rein auf den Einfluss der Rezyklatfasern zurückgeführt werden. Die folgende Tabelle gibt ein Überblick über die Eigenschaften der Ausgangsfasern.

Tabelle 6: Eigenschaften der verwendeten PCR-CO und VIR-CO

Experiment	PCR-CO (B20.1)	VIR-CO
L (n) [mm]	10,1	19,1
SFC (n) [%]	68,2	9,6
L (n) 5% [mm]	21,4	33,9
UQL (w) [mm]	17,6	29,3
TrashCount [cnt/g]	838	5
TotalTrashSize [µm]	1499	841
DustCount [cnt/g]	193	65
DustMeanSize [µm]	149	179

Die Tabelle zeigt deutliche Unterschiede zwischen der PCR-CO (B20.1) und der VIR-CO. Die Recyclingfaser weist mit 10,1 mm eine deutlich geringere mittlere Faserlänge auf als die VIR-CO mit 19,1 mm. Besonders auffällig ist der sehr hohe Kurzfaserteil SFC(n) von 68,2 % gegenüber 9,6 %, was Herausforderungen entlang der gesamten Prozesskette nach sich zieht.

Zudem ist die PCR-CO deutlich stärker verunreinigt, wie der TrashCount von 838 cnt/g gegenüber 5 cnt/g und der DustCount von 193 cnt/g gegenüber 65 cnt/g belegen. Insgesamt verdeutlichen die Kennwerte die spinntechnischen Herausforderungen der Recyclingfaser hinsichtlich Gleichmäßigkeit, Prozessstabilität und Garnqualität.

2.4.2 Untersuchungsraum und Methodik

Die Herstellung der Ringgarne mit PCR-CO erfolgte auf den Maschinen **Karde** → **Strecke** → **Flyer** → **Ringspinnmaschine**. Ziel ist die Herstellung von Garnen in den Feinheiten Nm 27/1 und Nm 41/2 unter Berücksichtigung eines möglichst hohen Anteils an PCR-CO bei anforderungsgerechter Garnqualität.

Aufgrund der geringen Faserlänge der Reißfasern aus Arbeitspaket 3 werden Vorversuche zur Ermittlung realistischer Rezyklatanteile durchgeführt. Anschließend erfolgt eine

systematische, erfahrungsbasierte Optimierung der Parameter der Karde und des Flyers sowie der Ringspinnmaschine. Diese drei Maschinen werden ausgewählt, da hier der größte Einfluss der Maschinenparameter auf die Garnqualität erwartet wird.

Kardieren

Die Kardierung bildet einen zentralen Prozessschritt zur Parallelisierung der Fasern und zur Bildung des Kardenbandes aus einem gleichmäßigen Faserflor. Das Kardieren stellt eine homogene Faserverteilung sicher, reinigt das Fasergemisch von Verunreinigungen. Nissen und verbleibende Garnstücke aus den Reißfasern werden aufgelöst oder ausgeschieden und auf diese Weise minimiert. Insbesondere bei der Verarbeitung von PCR-CO, die durch kurze und inhomogene Faserlängen gekennzeichnet ist, wirkt eine geeignete Kardeneinstellung stabilisierend für den weiteren Spinnprozess. Darüber hinaus tragen geeignete Kardeneinstellungen maßgeblich zur Verbesserung der Garngleichmäßigkeit, zur Reduktion von Garnfehlern sowie zur Erhöhung der Festigkeit und Weiterverarbeitbarkeit des Garns bei und stellen somit eine wesentliche Voraussetzung für die Erreichung der geforderten Garnqualität dar.

Flyer & Ringspinnmaschine

Flyer- und Ringspinnprozess dient der eigentlichen Garnbildung. Hier wird die Faser zu einem kontinuierlichen Garn versponnen. Dazu wird das Kardenband zunächst auf der Flyermaschine zu einem Vorgarn verstreckt und erhält eine stabilisierende Drehung. Das Vorgarn wird auf der Ringspinnmaschine zur finalen Feinheit verzogen und erhält die geforderte Garndrehung. Die kurzen Faserenden der PCR-CO erfordern Anpassungen der Spannung, Drehzahl und weiterer Parameter, um den geforderten Garnparametern zu genügen.

2.4.3 Vorversuche zur Validierung des Rezyklatanteils im Garn

Ziel der durchgeführten Vorversuche ist die Festlegung eines geeigneten Mischungsverhältnisses zwischen PCR-CO und VIR-CO.

Zur systematischen Bewertung des Einflusses unterschiedlicher Mischungsverhältnisse werden Kardenbänder mit variierendem Anteil an PCR-CO und VIR-CO mit Hilfe eines MDTA 3 Prüfgerätes hergestellt. Der MDTA 3 (Micro Dust and Trash Analyzer 3) der Firma TexTechno Herbert Stein GmbH & Co. KG, Mönchengladbach, ist ein Laborgerät zur Aufbereitung und Analyse kleiner Faserproben. Im Projekt wurde er genutzt, um Mischungen aus PCR-CO und VIR-CO im Labormaßstab zu einem kardenbandähnlichen Flor aufzubereiten. So können Mischungsverhältnisse bewertet werden, ohne aufwändige und materialintensive Erstversuche direkt an der Karde durchführen zu müssen. Die untersuchten Mischungen reichen von 10 % PCR-CO zu 90 % VIR-CO bis 50 % PCR-CO zu 50 % VIR-CO. Für jedes Mischungsverhältnis werden zwei Proben gefertigt, wobei eine Probe einen einfachen Durchlauf und die zweite Probe einen zweifachen Durchlauf auf dem MDTA 3 durchlief. Anschließend erfolgt die Verspinnung der Kardenbänder auf dem Ringspinntester des Instituts für Textiltechnik der RWTH Aachen

University, Aachen, um die grundsätzliche Spinnfähigkeit sowie die Faserqualität bewerten zu können. Vorteil des Ringspinn testers ist eine direkte Verspinnung des Kardenbandes ohne die Notwendigkeit weitere industrieller Prozessstufen. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, frühzeitig Aussagen zur Fadenbildung, zur Prozessstabilität sowie zu qualitativen Auffälligkeiten im Spinnprozess treffen zu können.

Die Ergebnisse der Vorversuche zeigen insbesondere bei höheren Post-Consumer-Recycling-Baumwolle-Anteilen deutliche Einschränkungen der Spinnbarkeit. Es treten sehr geringe Fadenlängen, ein unregelmäßiger Fadenballon sowie ein instabiler Spinnprozess mit häufigen Fadenrissen auf. Darüber hinaus werden vermehrt Dickstellen und Verknotungen beobachtet, sodass die Spindeldrehzahl deutlich reduziert werden muss. Aufgrund dieser Effekte war die Herstellung eines reproduzierbaren Garns nicht möglich, weshalb keine Festigkeitsprüfungen durchgeführt werden konnten. Auch die Erstellung von Garntafeln war lediglich in sehr begrenztem Umfang realisierbar, wie die folgende Abbildung zeigt:

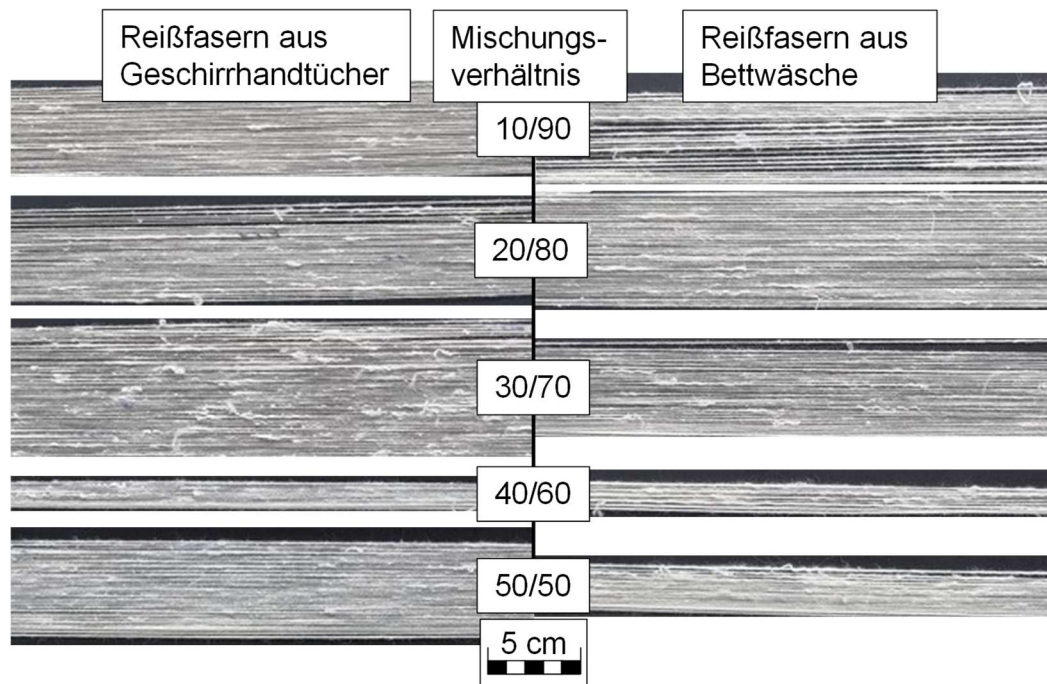


Abbildung 8: Garntafeln zu den Vorversuchen mit unterschiedlichen Anteilen gerissener Geschirrhandtücher und Bettwäsche in Mischung mit Virgin-Baumwolle

Die Vorversuche liefern dennoch wichtige Hinweise zur grundsätzlichen Einordnung der Versuchsanordnung. Es können keine verwertbaren spinnereitechnischen Ergebnisse im Sinne einer stabilen Garnbildung erzielt werden. Zudem zeigte sich, dass die auf der MDTA 3 erzeugten Faserbündel nicht direkt mit industriell hergestellten Kardenfaserbündeln vergleichbar sind, wodurch die Übertragbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt ist. Zur weiteren Bewertung werden die Ergebnisse mit Erfahrungen aus früheren Projekten abgeglichen. In diesen Projekten können 50 % PCR-CO/50 % VIR-CO-Mischungen bereits erfolgreich versponnen werden, allerdings weisen die hergestellten Garne eine

deutlich reduzierte Festigkeit auf und sind nur eingeschränkt für weiterführende Anwendungen geeignet.

Auf Basis der Vorversuche, der Erkenntnisse aus Kapitel 2.3 sowie der Erfahrungen aus früheren Projekten werden ein Blendlevel von 30 % PCR-CO zu 70 % VIR-CO als realistisch festgelegt. Diese Entscheidung stellt einen bewussten Kompromiss zwischen einer ausreichenden Verarbeitbarkeit in der Ringspinnprozesskette und einer noch akzeptablen Garnfestigkeit dar und bildete die Grundlage für die nachfolgenden Prozessoptimierung im Arbeitspaket 4.

2.4.4 Prozessoptimierung und Versuchsdurchführung Karde TC11

Auf Basis von Vorerfahrungen aus einer Masterarbeit zur Verarbeitung von PCR-CO/VIR-CO-Mischungen auf der Karde, durchgeführt von Tina Buck, erfolgte die Grundeinstellung der Karde TC11 von Trützscher, Mönchengladbach [BCC24]. Die Versuchsdurchführung und Optimierung der Parameter an der Karde erfolgten gemeinsam mit Otto. Dabei werden das Laufverhalten der Kardenbänder und die Bandqualität von einem Kardenspezialisten mit 30-jähriger Berufserfahrung analysiert und bewertet. Die Einschätzung durch den Kardenspezialisten fällt insgesamt positiv aus. Das Laufverhalten wird als stabil bewertet, wobei iterative Anpassungen der Einstellungen, insbesondere in Bezug auf Drehzahlen und Verzugsverhältnisse, vorgenommen werden. Auf Grundlage dieser Ergebnisse erfolgte eine subjektive, aber fachlich fundierte Freigabe der Kardenbänder für eine Produktionsmenge von ca. 300 kg Kardenband zu 5 ktex Bandgewicht und 60.000 m Länge. Vergleichende Qualitätsmessung an Kardenbändern aus 100 % VIR-CO und der gewählten Mischung sind in Abbildung 7 dargestellt.

Tabelle 7: Kardenbandvergleich zwischen Bändern aus 100 % VIR-CO und der Faser-
mischung aus 30 % PCR-CO zu 70 % VIR-CO

Qualitätsparameter Kardenband	Reference Card Sliver 100% VIR-CO (Otto)	30 % PCR-CO & 70 % VIR-CO (B20.1)
L(n) [mm]	19,1	16,8
SFC (n) [%]	9,6	16,5
L(n) 5% [mm]	33,9	21,4
UQL (w) [mm]	29,3	30,1
Trash Count [cnt/g]	5	1
Total TrashSize [µm]	841	1481
Dust Count [cnt/g]	65	17
Dust MeanSize [µm]	179	108
TotalNepCount [Cnt/g]	188	174

Die Analyse der Kardebänder zeigt signifikante Unterschiede. Ein zentraler Aspekt ist die mittlere Faserlänge L(n), die bei der Probe B20.1 mit 16,8 mm deutlich kürzer ausfällt als bei der Referenz mit 19,1 mm. Zudem weist die Probe B20 mit 16,5 % einen deutlich höheren Kurzfaserteil (SFC(n)) gegenüber den 9,6 % der Referenz auf, was unmittelbar Einfluss auf die spätere Garnfestigkeit nehmen kann.

Die Nissen liegen im Kardenband mit PCR-CO bei 174 Nissen pro Gramm (Total-NepCount) eine leicht bessere Qualität als das Referenzmaterial mit 188 Nissen. Ein differenziertes Bild ergibt sich bei den Verunreinigungen: Während B20 mit lediglich 1 Partikel pro Gramm (TrashCount) eine geringere Schmutzbelastung als die Referenz (5 cnt/g) aufweist, ist die durchschnittliche Größe dieser Partikel mit 1.481 μm nahezu doppelt so hoch wie beim Referenzwert von 841 μm . Die Staubbelastung (DustCount) ist bei B20.1 mit 17 Partikeln pro Gramm ebenfalls deutlich niedriger als bei der Referenz, die 65 Partikel pro Gramm aufweist.

Die Versuche an der Karde zeigen Defizite in der Verarbeitung mechanisch recycelter Fasern auf, aus denen neue Untersuchungsfelder für nachfolgende Projekte abgeleitet werden können. Dazu zählen die Auswahl und Anpassung geeigneter Trägerfasern hinsichtlich der Stapellänge, Fragestellungen zur Wirtschaftlichkeit und Produktivität, die Öffnung von Garnresten sowie Fasereinkürzung im Recyclingprozess und der Einfluss des Einsatzes von Hilfsstoffen wie Spinnmitteln für einen verbesserten Prozessablauf und spätere Spinnstabilität.

2.4.5 Versuchsdurchführung Strecke TD8

Der Strecke werden sechs Bänder vorgelegt, die durch sechsfachen Verzug wieder zur Ausgangsfeinheit von 5 ktex verzogen werden. Die Versuche an der Strecke TD8 der Trützschler Group, Mönchengladbach, zeigten eine erhöhte Staubbildung am Streckwerk, jedoch insgesamt ein gutes Verstreckverhalten des Materials. Basierend auf Vorerfahrungen wird bewusst nur eine Streckpassage eingesetzt, da sich in Vorarbeiten gezeigt hat, dass zusätzliche Durchläufe einer Verschlechterung der Gleichmäßigkeit führen. Die ca. 300 kg Material könne erfolgreich verstreckt werden.

2.4.6 Prozessoptimierung und Versuchsdurchführung am Flyer

Aufgrund des erhöhten Aufwands für die Versuche zum Reißen werden die Flyereinstellungen auf der Basis interner Untersuchungen zu ähnlichen Materialkombinationen und der langjährigen Erfahrung der Firma Otto festgelegt.

Bei Versuchen zur Verarbeitung einer Mischung aus 50 % PCR-CO aus ausgediente Alttextilien der Straßensammlung und 50 % VIR-CO im Recycling Atelier der THA zu Garn zeigten sich signifikante Verbesserungen der Nissenzahl in Abhängigkeit des Verzugsverhältnisses zwischen Flyer und Ringspinnmaschine. Ein geringerer Verzug am Flyer in Kombination mit einem höheren Verzug an der Ringspinnmaschine erwies sich als vorteilhaft für die Lauffähigkeit und die Garnwerte und insbesondere signifikant für eine Reduktion der Nissenzahl im Garn. Diese Erfahrungen wird adaptiert und das ermittelte Verhältnis von 4,95fachem Verzug am Flyer zu 34,34fachem Verzug an der Ringspinnmaschine auf die vorliegende Fasermischung angewandt.

Die Feinheit für das Vorgarn wird auf den Erfahrungen der Firma Otto auf Nm 1 festgelegt. Mit den Einstellungen wurden ca. 300 kg Streckenband hergestellt und erfolgreich

auf einer Flyermaschine Autoconer A5 Speed der Firma Saurer Spinning Solutions GmbH & Co. KG, Übach-Palenberg, verarbeitet. Herausforderungen bei der Verarbeitung des Materials am Flyer ist eine erhöhte Staubbildung.

2.4.7 Prozessoptimierung und Versuchsdurchführung an der Ringspinnmaschine

Der Spinnprozess wird sowohl an der THA als auch bei Otto untersucht. Zunächst werden an der THA zehn Flyerlunten mit der Feinheit Nm 1 hergestellt und auf einer Ringspinnmaschine Zinser 351 2Impact FX der Firma Saurer Spinning Solutions GmbH & Co. KG, Übach-Palenberg, zu zehn Kopsen mit einer Feinheit von Nm 27 ausgesponnen. Die Ergebnisse der Gleichmäßigkeits- und Haarigkeitsmessung sind in der folgenden Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Ergebnisse der Garnherstellung zu Gleichmäßigkeit und Haarigkeit

Gleichmäßigkeits- und Haarigkeitswerte	Mittelwert	σ	CV-Wert
Abs. Feinheit (Nm)	26,52	0,29	1,1
Haarigkeit (H-Wert)	8,54	0,31	3,6
sh	2,15	0,09	4,1
S3u [/100m]	6103	1009	16,5
S1+2u [/100m]	23226	1461	6,3
2DØ [mm]	0,343	0,003	0,8
CV2D 8mm [%]	16,97	0,52	3,1
CV2D 0,3mm [%]	20,86	0,46	2,2
CV FS [%]	12,13	0,22	1,8
Formfaktor	0,81	0	0,5
Dichte [g/cm ³]	0,41	0,01	1,8

Die anschließende Qualitätsprüfung der zehn Kopsen bestätigte eine präzise Umsetzung der Vorgaben. Die ermittelte absolute Feinheit liegt im Mittelwert bei Nm 26,52, was eine geringfügige Abweichung vom angestrebten Sollwert von Nm 27 darstellt. In Bezug auf die Garnstruktur wird eine durchschnittliche Haarigkeit (H-Wert) von 8,54 gemessen, bei einem mittleren Garndurchmesser von 0,343 mm. Die Dichte des produzierten Garns im Mittel bei 0,41 g/cm³.

Die Analyse der Garnungleichmäßigkeit liefert Einblicke in die Prozessstabilität. Der Variationskoeffizient der Masse (CV2D 8mm) beträgt im Durchschnitt 16,97 %. Bei der Erfassung von Fehlerstellen werden im Mittel 6.103 S3u-Ereignisse pro 100 m sowie 23.226 S1+2u-Ereignisse pro 100 m erfasst. Während die grundlegenden Parameter eine gute Reproduzierbarkeit zeigen, deutet die Variabilität der Festigkeitswerte, CV der H-Kraft von 14,96 %, auf Ungleichmäßigkeiten im Garn hin. Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen am Garn sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 9: Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen am Garn

Statistik	Zeit bis zum Bruch [s]	H-Kraft [N]	Dehnung [%]	Spez. Fest. [cN/tex]	H-Arbeit [cN.cm]
Mittelwert	0,59	6,49	6,17	17,53	959,96
CV-Wert	5,49	14,96	7,77	14,96	17,70
Minimal	0,48	4,16	4,96	11,24	540,52
Maximal	0,65	12,12	7,28	32,73	1762,52

Das Garn weist eine durchschnittliche Höchstzugkraft H-Kraft von 6,49 N auf. Dies ergibt eine spezifische Festigkeit von 17,53 cN/tex und liegt damit über den geforderten 17,00 cN/tex aus den Anforderungen.

Untersuchung zum Kompaktspinnen durch mechanisches Kompaktssystem

Aufgrund des hohen Kurzfasergehalts wird untersucht, wie die Fasern besser gebündelt und abstehende Fasern stärker eingebunden werden können. Hierfür wird das mechanische Kompaktssystem RECOMPAKT 3.0 der Firma Swinsol, Au, Schweiz, eingesetzt, bei dem die Fasern in einem Kompaktor vom Typ cpl. 27/0,9 Trio 6S gebündelt, das Spinn dreieck reduziert und die Einbindung abstehender Fasern verbessert wird.

Im Rahmen der Versuchsreihe wird geprüft, ob eine mechanische Kompaktierung zur Verbesserung der Haarigkeit und Festigkeit des Garns eingesetzt werden kann. Ziel ist es, durch eine Reduktion des Spinn dreiecks eine bessere Bündelung der Kurzfasern zu erreichen und dadurch abstehende Fasern stärker in den Garnkörper einzubinden.

Hierfür wird Verdichter mit einer Breite von 0,9 mm eingesetzt. Die übliche Kompaktorbreite von 0,6 mm kann lediglich bis etwa Nm 50 verwendet werden. Bei feineren Garnen beziehungsweise bei Garnen mit erhöhtem Auftreten von Dickstellen und Nissen besteht die Gefahr, dass der Verdichter zu eng wird und verstopft. Die Wahl der größeren Breite von 0,9 mm erfolgt daher bewusst, um eine höhere Toleranz gegenüber Garnunregelmäßigkeiten zu schaffen.

Weitere Maschineneinstellungen umfassen einen AOW-Zylinder Bräcker B65 mit 63 Shore, mit dem bei 100 % CO sehr gute Erfahrungen vorlagen. Zudem wird die Clipstufe Schwarz gewählt, wobei aufgrund der hohen Anzahl an Durchziehern eine hohe Klippstufe eingestellt werden muss. Als Läufer kommt ein EM1 dr zum Einsatz, ein hochbogiger Läufer mit vergrößertem Abstand zwischen Ring und Läufer, um ein Verfangen des Fadens zu vermeiden. Das dr-Profil dient zusätzlich der Reduktion von Faserschäden.

Im Versuch zeigt sich jedoch, dass das Garn eine sehr hohe Anzahl an Dickstellen und Nissen aufwies. Diese sind teilweise so ausgeprägt, dass die Verdichter trotz der größeren Breite wiederholt verstopften. Infolgedessen kam es zu häufigen Fadenbrüchen und einer erheblichen Anzahl an Durchziehern. Aufgrund der mangelnden Prozessstabilität muss der Kompaktversuch abgebrochen werden.

Für weiterführende Vorversuche steht nicht ausreichend Vorgarn zur Verfügung, sodass zusätzliche Läuferversuche zur detaillierten Analyse von Garnwerten und Haarigkeit

nicht durchgeführt werden können. Der anschließende Hauptversuch wird daher als konventionelles Ringgarn ohne mechanische Kompaktierung ausgesponnen.

2.4.8 Hauptspinnversuche bei Otto

Die Hauptspinnversuche haben zum Ziel, aus dem vorhandenen Vorgarn die Feinheiten Nm 27/1 und Nm 41/1 herzustellen. Beide Feinheiten werden als konventionelle Ringgarne ausgesponnen. Die Maschineneinstellungen umfassten einen AOW B65 (Bräcker) mit 63 Shore, einen Käfig Texpart 2142, eine schwarze Clipstufe, die aufgrund der zahlreichen Durchzieher hoch gewählt werden muss, sowie den Läufer EM 1 dr, einen hochbogigen Läufer mit großem Abstand zwischen Läufer und Ring.

Das Laufverhalten, während der Hauptspinnversuche ist durch sehr viele Fadenbrüche gekennzeichnet, die auf die hohe Anzahl an Dickstellen und Nissen zurückzuführen sind. Zusätzlich treten zahlreiche Durchzieher auf, und es kommt zu einer starken Verstaubung der Ringspinnmaschine infolge des hohen Kurzfasergehalts. Zur Verbesserung der Herausforderung durch Staub sollte in weiterführenden Arbeiten der Einsatz von Spinnmitteln und angepassten Trägerfasern untersucht werden.

Die Garnwerte für beide Feinheiten, Nm 27/1 und Nm 41/2, zeigen sehr viele Dünn- und Dickstellen sowie Nissen, was sich in insgesamt schlechten IPI-Werten widerspiegelte. Im Vergleich zur USTER®-Statistik 2023 weist das Garn Nm 27/1 eine höhere Festigkeit und eine bessere Gleichmäßigkeit auf, während das gezwirnte Garn Nm 41/2 durch eine geringere Festigkeit und stärkere Ungleichmäßigkeiten gekennzeichnet ist.

Die spezifische Festigkeit liegt für Nm 41 bei 16,34 cN/tex und für Nm 27 bei 18,64 cN/tex. Damit liegt die Festigkeit über dem 5%-Perzentil der USTER®-Statistik 2023, was bedeutet, dass nur etwa 5 % der vergleichbaren ringgesponnenen Garne mit gleicher Feinheit und Zusammensetzung eine ähnliche Festigkeit aufweisen. Gleichzeitig liegt die Gleichmäßigkeit unterhalb des 95%-Perzentils, sodass 95 % der vergleichbaren Garne eine höhere Gleichmäßigkeit erzielen (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10: Garnparameter für Nm 27/1 und Nm 40/2

Garnfeinheiten [Nm]	Ist-Feinheit [Nm]	Spez. Festigkeit [cN/tex]	CVm [%]
Nm41	41,29	16,34	25,75
Nm27	27,28	17,5	22,41

Vergleiche zwischen Ring- und Rotorspinnen sowie zum Ring-Kompaktsystem von Saurer waren angedacht, können jedoch im Rahmen dieses Arbeitspakets nur für den direkten Vergleich der Spinnverfahren durchgeführt werden. Die Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 11: Vergleich Ring- und Rotorgarnherstellung

Garnfeinheiten & Spinnverfahren	Ist-Feinheit [Nm]	Spez. Festigkeit [cN/tex]	CVm [%]
Nm 27 Ring	26,5	17,5	21
Nm 27 Rotor	26,5	14,8	13
Nm 41 Ring	41,3	16,3	18,6
Nm 41 Rotor	40,8	14,3	14,6

Festigkeit (cN/tex): Das Ringspinnverfahren liefert durchweg höhere Festigkeitswerte. Bei Nm 27 erreicht das Ringgarn 17,5 cN/tex, während das Rotorgarn nur 14,8 cN/tex erzielt. Ähnliches zeigt sich bei Nm 41 (16,3 zu 14,3 cN/tex). Dies liegt wahrscheinlich an der höheren Parallellage und der echten Drehung im Ringgarn.

Gleichmäßigkeit (CVm %): Hier ist das Rotorspinnverfahren deutlich überlegen. Bei Nm 27 weist das Rotorgarn einen CVm-Wert von nur 13,0 % auf, im Gegensatz zu den 21,0 % des Ringgarns. Rotor-Garne sind strukturbedingt meist gleichmäßiger, da der Ausspinnprozess weniger empfindlich auf kurzstapelige Fasern reagiert.

2.4.9 Fazit zu Arbeitspaket 4

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Ziele des Arbeitspakets größtenteils erfüllt werden konnten. Aufgrund der kurzen Faserlängen war eine Anpassung des Rezyklatanteils erforderlich. Ein Anteil von 30 % PCR-CO wurde in Vorversuchen als realistisch eingeschätzt, um die geforderten Garnparameter zu erreichen und gleichzeitig eine hohe Umweltwirkung zu erzielen. Die Kardeneinstellungen konnten erfolgreich angepasst und ca. 300 kg Kardenband hergestellt werden. Ebenso gelang die Verarbeitung von ca. 300 kg Material über eine Streckpassage, die Erarbeitung geeigneter Flyereinstellungen für Verzug und Flyerluntenfeinheit sowie die Produktion von ca. 300 kg Flyerlunte. Optimierte Ringspinnmaschineneinstellungen wurden an der THA erarbeitet und in einem Praxistest bei Otto mit ca. 300 kg Material überprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass das Material grundsätzlich verarbeitbar ist, jedoch mit niedrigen Garnkennwerten und hohem Faserflug einhergeht, was potenziell störend für weitere Produktionsprozesse sein kann. Zudem wurde der große Unterschied in der mittleren Faserlänge zwischen PCR-CO und VIR-CO als Forschungspotential identifiziert, bei dem eine einheitlichere Faserlänge gegebenenfalls zu prozesstechnischen und wirtschaftlichen Vorteilen führen kann. Weiter Ansätze für Verbesserungen sind der Einsatz von Spinnmitteln zur Verbesserung der Prozessstabilität und des Faserflugs sowie weiterführende, intensive Untersuchungen der Spinnereiparameter sowie weiterführende Arbeiten zur Kompaktierung des Garns durch weitere physikalische Systeme.

2.5 Arbeitspaket 5: Validierung der technischen Machbarkeit

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Validierung der technischen Machbarkeit der in den Arbeitspaketen AP1 bis AP4 entwickelten Prozesskette zur Herstellung anforderungsgerechter Frottierhandtücher aus PCR-CO-haltigen Garnen. Die Validierung setzt bewusst auf der Ebene der verfügbaren Garne an und fokussiert die nachgelagerten Prozessschritte bis zur Herstellung und Bewertung des Endprodukts. Die vorangehenden Prozessschritte, einschließlich Sammlung und Sortierung, Störstoffentfernung, des Reißprozess sowie der Spinnereivorbereitung und Spinnerei, wurden in den Arbeitspaketen AP1 bis AP4 beschrieben und werden im vorliegenden Kapitel nicht erneut dargestellt, sondern als validierte Prozessgrundlage vorausgesetzt. Die Validierung konzentriert sich auf den erstmaligen Nachweis der Herstellbarkeit anforderungsgerechter Frottierhandtücher aus PCR-CO-haltigen Garnen. Die Ergebnisse des Arbeitspakets liefern jedoch eine belastbare Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Mehrfachzyklierbarkeit und zum Design for Recycling.

2.5.1 Herstellung der Frottierhandtücher aus Post-Consumer-Recycling Garnen

Die Herstellung der Frottierhandtücher erfolgt unter Verwendung der in den vorangegangenen Arbeitspaketen produzierten PCR-CO-haltigen Garne. Die nachgelagerten Prozessschritte Weben, Ausrüstung und Konfektionierung werden durch den Projektpartner Weseta Textil AG durchgeführt. Das Zetteln, Schären und Schlichten der Oberkette, sowie Schären der Oberkette werden von Weseta Textil AG an ein externes Unternehmen vergeben, das nicht Teil des Projektkonsortiums ist. Das Schlichten dient dazu, die Kettgarne durch den Auftrag einer Schlichte in ihrer Abriebfestigkeit, Zugfestigkeit und Oberflächenglätte zu erhöhen, um Fadenbrüche zu reduzieren und eine stabile Prozessführung im Webprozess sicherzustellen. Ziel ist es, die Verarbeitbarkeit der Garne unter praxisnahen industriellen Bedingungen zu untersuchen und die Eignung der entwickelten Prozesskette bis zur Produktebene zu überprüfen.

2.5.1.1 Betrachtung des Webprozesses

Nach der Kettenherstellung werden die vorbereiteten Ketten im Webprozess zusammengeführt. Die Oberkette, die zuvor gezettelt und geschlichtet wurde, sowie die Unterkette (Polkette), die gezettelt, jedoch nicht geschlichtet ist, werden gemeinsam mit dem Schussgarn auf der Webmaschine verarbeitet. Das Weben der Frottierhandtücher erfolgt auf einer Jacquard Webmaschine. Der Schuss wird mittels Luftdrucks eingetragen. Das produzierte Garn wird dabei unter identischen Maschineneinstellungen, insbesondere hinsichtlich der Webgeschwindigkeiten, verarbeitet wie ein vergleichbares Standardprodukt aus konventionellen Garnen. Eine Anpassung der Prozessparameter oder

Sonderbehandlung des Recyclinggarns erfolgt bewusst nicht, um eine realistische industrielle Verarbeitungssituation abzubilden. Die Tuchlänge beträgt 1,5 m, insgesamt werden 250 Frottierhandtücher gefertigt.

2.5.1.2 Prozessbedingte Auffälligkeiten im Webprozess

Während des Webprozesses treten mehrere prozessbedingte Auffälligkeiten auf, die auf die Eigenschaften der eingesetzten Post-Consumer Garne zurückzuführen sind. Die beobachteten Effekte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Kett- und Schussfadenbrüche (22 Kett- und 27 Schussfadenbrüche)
2. Lokale Dick- und Dünnstellen im Kettgarn
3. Erhöhter Faserflug im Vergleich zu konventionellen Garnen

Eine quantitative Einordnung der Fadenbruchhäufigkeit in Relation zu Laufzeit oder Gewebelänge ist nicht möglich, da entsprechende Referenzgrößen nicht erfasst wurden. Die dokumentierten Fadenbrüche werden daher qualitativ nach Expertenwissen des Webers bewertet und im Zusammenhang mit den im Garn festgestellten Inhomogenitäten betrachtet. Besonders auffällig sind lokale Dickstellen im Kettgarn, die während des Webens sichtbar werden (vgl. Abbildung 9). Diese Inhomogenitäten führen dazu, dass einzelne Kettfäden nicht zuverlässig durch Litzen und Riet geführt werden oder sich im Webfach verhaken. In der Folge kommt es zu erhöhten Fadenbruchraten sowie zu prozessbedingten Stillständen. Die beobachteten Fadenbrüche werden daher überwiegend auf das Zusammenspiel aus Dick- und Dünnstellen im Garn zurückgeführt.

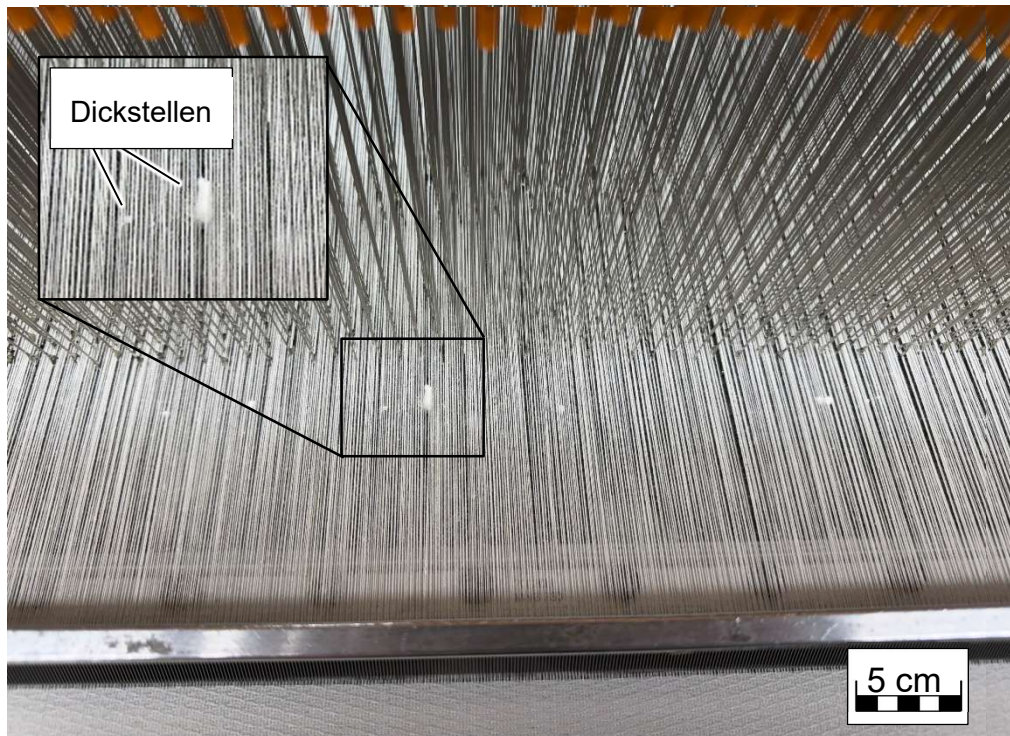


Abbildung 9: Dickstellen in der Kette

Der erhöhte Faserflug ist ebenfalls bereits aus dem Spinnprozess bekannt (vgl. Kapitel 2.4) und resultiert aus dem erhöhten Kurzfaserteil sowie der angenommenen Faserbeschädigung der Recyclingfasern. Im Webprozess führt der Faserflug zu einer erhöhten Verschmutzung von Maschine und Umgebung und kann darüber hinaus zur Verunreinigung benachbarter Gewebe beitragen. Diese Effekte beeinträchtigen die Prozessstabilität und erhöhen den Reinigungs- und Wartungsaufwand, ohne jedoch den Webprozess grundsätzlich zu verhindern.

Insgesamt verdeutlichen die beschriebenen Auffälligkeiten die erhöhte Sensitivität des Webprozesses gegenüber Garninhomogenitäten, insbesondere bei der Verarbeitung von Post-Consumer Garnen unter unveränderten industriellen Prozessbedingungen. Die nachgelagerten Prozessschritte können ohne wesentliche Abweichungen durchgeführt werden, sodass am Ende gebrauchsfähige, wie im Antrag vorgesehene Handtücher produziert werden, siehe Abbildung 1.

2.5.2 Zusammenfassende Bewertung der technischen Umsetzbarkeit

Die im Rahmen dieses Arbeitspakets hergestellten Frottierhandtücher wurden im Hinblick auf die in Arbeitspaket 1 definierten Produkthanforderungen bewertet. Dabei zeigt sich, dass die gefertigten Produkte die festgelegten Kriterien hinsichtlich Konstruktion, Abmessungen, Flächengewicht und Farbgebung erfüllen. Eine erneute detaillierte Darstellung der Produkthanforderungen erfolgt an dieser Stelle nicht, da diese bereits in AP1 umfassend beschrieben wurden.

Die Ergebnisse bestätigen, dass die in den vorangegangenen Arbeitspaketen entwickelte Prozesskette geeignet ist, ein anforderungsgerechtes Frottierhandtuch aus Post-Consumer Garnen herzustellen. Gleichzeitig verdeutlichen die im Webprozess beobachteten Auffälligkeiten, dass die Prozessstabilität, insbesondere bei unveränderten industriellen Einstellungen, eine zentrale Stellgröße für die weitere Optimierung darstellt.

Die Bewertung der Produkte ist zudem im Kontext des jeweiligen Einsatzbereichs einzuordnen. Während im Haushaltsbereich geringere Anforderungen an die Waschbeständigkeit gestellt werden, ist im Hotel- und Objektbereich eine Industrewäsche mit erhöhten Waschttemperaturen und einer hohen Anzahl an Waschzyklen erforderlich. Vor diesem Hintergrund gewinnen konstruktive Parameter wie Flächengewicht sowie Kett- und Schussfadendichte zusätzlich an Bedeutung, da sie sowohl die Gebrauchstauglichkeit als auch die Recyclingfähigkeit der Frottierhandtücher beeinflussen.

Neben der technischen Umsetzbarkeit wird auch die Wirtschaftlichkeit des Recyclingansatzes qualitativ eingeordnet. Die im Webprozess beobachteten Einschränkungen der Prozessstabilität, insbesondere erhöhte Fadenbruchraten, prozessbedingte Stillstände sowie zusätzlicher Reinigungs- und Wartungsaufwand infolge von Faserflug, wirken sich nachteilig auf die Prozesseffizienz aus. Unter den gewählten, praxisnahen industriellen Bedingungen wird der Ansatz daher von den Projektpartnern derzeit nicht als wirtschaftlich tragfähig bewertet.

Zusammenfassend wird der textile Kreislauf im Projekt technisch bis zur Produktebene geschlossen und validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Herstellung anforderungsgerechter Frottierhandtücher aus PCR-CO-haltigen Garnen technisch möglich ist und die entwickelte Prozesskette grundsätzlich geeignet ist, einen geschlossenen textilen Kreislauf bis zur Produktebene abzubilden. Die wiederholte stoffliche Rückführung derselben Produkte stellt einen darauf aufbauenden Validierungsschritt dar und konnte im verfügbaren Projektzeitraum nicht umgesetzt werden.

2.5.3 Identifizierter Entwicklungs- und Forschungsbedarf

Aus den Ergebnissen des Arbeitspakets ergibt sich ein klarer weiterer Forschungsbedarf zur gezielten Weiterentwicklung des Recyclingansatzes. Zentrale Ansatzpunkte liegen insbesondere in der Erhöhung des Durchsatzes und der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Reißprozesses, da die im Projekt beobachtete Ausschussrate von rund 35 % einen maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtprozesseffizienz hat.

Darüber hinaus ist eine systematische Analyse der Faserschädigung erforderlich, um das Verhalten von Recyclingfasern entlang der Prozesskette besser zu verstehen und prozessbedingte Verluste gezielt zu reduzieren. Aufbauend darauf besteht weiterer Optimierungsbedarf in der Anpassung der Kardierprozesse an sekundäre Baumwollfasern, um Kurzfasern effizienter einzubinden und die Homogenität der Kardenbänder zu verbessern.

Ein weiterer Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten liegt in der Entwicklung und Erprobung geeigneter Spinnmittel für Recyclingbaumwolle, mit dem Ziel, insbesondere kurze und geschädigte Fasern stabiler in den Spinnprozess zu integrieren. Ergänzend dazu ist der Einfluss unterschiedlicher Stapellängen auf Verarbeitbarkeit, Prozessstabilität und Wirtschaftlichkeit systematisch zu untersuchen, insbesondere im Kontext von Fasermischungen aus Primär- und Recyclingfasern.

Schließlich zeigt sich ein Bedarf an einem technologischen Benchmark verschiedener Spinnereitechnologien, um zu bewerten, welche Verfahren sich für Recyclingfasern mit spezifischen Anforderungen an Feinheit, Gleichmäßigkeit und Garnqualität besonders eignen. Die genannten Aspekte bilden eine wesentliche Grundlage für weiterführende Forschungsarbeiten und die Ausgestaltung eines Folgeantrags zur Stabilisierung und wirtschaftlichen Skalierung textiler Recyclingprozesse.

2.6 Arbeitspaket 6: Life Cycle Assessment

Ziel des Arbeitspakets 6 ist die ökobilanzielle Bewertung (Life Cycle Assessment, LCA) der im Projekt entwickelten Prozesskette zur Herstellung von Frottierhandtüchern mit einem Anteil an PCR-CO. Die Lebenszyklusanalyse dient dem Nachweis der umweltbezogenen Vorteile der teilweisen Kreislaufführung von Baumwollfasern im Vergleich zu einem konventionell hergestellten Frottierhandtuch aus 100 % VIR-CO. Die Ökobilanz wird durch das bifa Umweltinstitut GmbH im Auftrag des Projekts durchgeführt und orientiert sich an den Normvorgaben DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044. Im Fokus der Untersuchung steht die vergleichende Bewertung relevanter Umweltwirkungen entlang des Produktlebenswegs sowie die Identifikation von Prozessschritten mit wesentlichem Einfluss auf die Gesamtbilanz. Die folgenden Abschnitte fassen Zielsetzung, Untersuchungsrahmen und zentrale Ergebnisse der Ökobilanz zusammen, detaillierte methodische Beschreibungen und vollständige Ergebnisse sind dem LCA-Bericht im Anhang zu entnehmen.

2.6.1 Zielsetzung und Einordnung der Ökobilanz

Die Lebenszyklusanalyse verfolgt das Ziel, die umweltbezogenen Auswirkungen eines im Projekt entwickelten Frottierhandtuchs mit Recyclingfaseranteil systematisch zu bewerten und diese mit einem konventionellen Frottierhandtuch aus 100 % VIR-CO zu vergleichen. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, inwieweit die teilweise Substitution von Primärfasern durch PCR-CO zu messbaren ökologischen Vorteilen über den gesamten Produktlebensweg führt.

Die Bewertung erfolgt entlang relevanter Umweltwirkungskategorien, die einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtumweltwirkung textiler Produkte leisten. Neben der quantitati-

ven Ermittlung der Umweltwirkungen dient die Ökobilanz auch der Identifikation von Prozessschritten mit hohem Einfluss auf die Gesamtbilanz, um potenzielle Ansatzpunkte für eine weitere ökologische Optimierung der Prozesskette aufzuzeigen.

Die Ergebnisse der Ökobilanz werden im Projektkontext eingeordnet und dienen als ergänzende Entscheidungsgrundlage zur technischen Bewertung der Prozesskette. Die Analyse unterstützt damit die übergeordnete Zielsetzung des Projekts, die Rückführbarkeit von Baumwollfasern in einen textilen Kreislauf aufzuzeigen und zu belegen, dass die erneute Verarbeitung von Recyclingfasern im Vergleich zu Virginfasern mit positiven Umweltauswirkungen und einer Reduzierung der Gesamtumweltbelastung entlang des Produktlebenswegs verbunden ist.

2.6.2 Untersuchungsrahmen und methodische Grundlagen

Die methodische Ausgestaltung sowie die detaillierte Beschreibung der Modellannahmen, Datengrundlagen und Berechnungsverfahren sind dem vollständigen LCA-Bericht im Anhang 4 zu entnehmen.

Der Untersuchungsrahmen umfasst den Produktlebensweg eines Frottierhandtuchs von der Rohstoffbereitstellung bis zur Fertigstellung des Produkts. Zusätzlich werden die Nutzungsphase mit einem angenommenen Umfang von 150 bis 200 Waschzyklen über einen Zeitraum von etwa vier bis fünf Jahren sowie die Entsorgung durch thermische Verwertung berücksichtigt. Die Systemgrenzen sind für beide betrachteten Szenarien identisch definiert, um eine konsistente Vergleichbarkeit sicherzustellen.

Bilanzierte Szenarien sind zum einen ein konventionell hergestelltes Frottierhandtuch aus 100 % VIR-CO und zum anderen ein Frottierhandtuch aus dem ECO YARN Prozess mit einem Anteil von 30 % PCR-CO.

Die ökobilanzielle Bewertung erfolgt anhand ausgewählter Umweltwirkungskategorien. Diese Kategorien werden herangezogen, da sie einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtumweltwirkung textiler Produkte leisten und für den Vergleich der betrachteten Szenarien besonders aussagekräftig sind.

2.6.3 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse zeigen, dass das Szenario ECO YARN Prozess mit 30 % PCR-CO gegenüber dem klassischen Prozess aus 100 % VIR-CO in allen betrachteten Wirkungskategorien ökologisch vorteilhafter abschneidet.

In Abbildung 10 sind die Treibhauspotenziale beider Szenarien über den gesamten Lebensweg dargestellt. Für den klassischen Prozess ergibt sich ein Gesamtwert von 10,8 kg CO₂-Äquivalenten, während der ECO YARN Prozess einen Wert von 10,0 kg CO₂-Äquivalenten aufweist. In beiden Szenarien stellt die Spinnereivorbereitung und Spinnerei den größten Einzelbeitrag zur Klimawirkung dar und ist für rund 53 % der CO₂-Emissionen verantwortlich. Die Reduktion im ECO YARN Prozess ist im Wesentlichen auf die

teilweise Substitution der Baumwollherstellung durch Recyclingfasern zurückzuführen. Für diesen Lebenswegabschnitt ergibt sich im Vergleich zum klassischen Prozess eine Verringerung der CO₂-Äquivalente von etwa 2 %, da die Herstellung und der Transport von Baumwolle, im betrachteten Fall aus Spanien nach Deutschland, anteilig vermieden werden. Auffällig ist, dass der Prozessschritt zur Flächenherstellung und Konfektionierung im ECO YARN Prozess 2 % mehr der CO₂-Äquivalente aufweist. Dieser Unterschied kann im Zusammenhang mit der im Prozess getätigten Beobachtung der erhöhten Anzahl an Fadenbrüchen und daraus resultierenden Stillständen stehen. Geringere Beiträge zu den Gesamtemissionen sind ebenfalls den Prozessen der Flächenherstellung, Konfektionierung und landwirtschaftlichen Baumwollbereitstellung zuzuordnen, wobei vor allem der Energiebedarf der Ausrüstung sowie vorgelagerte agrarische Prozesse wirksam werden.

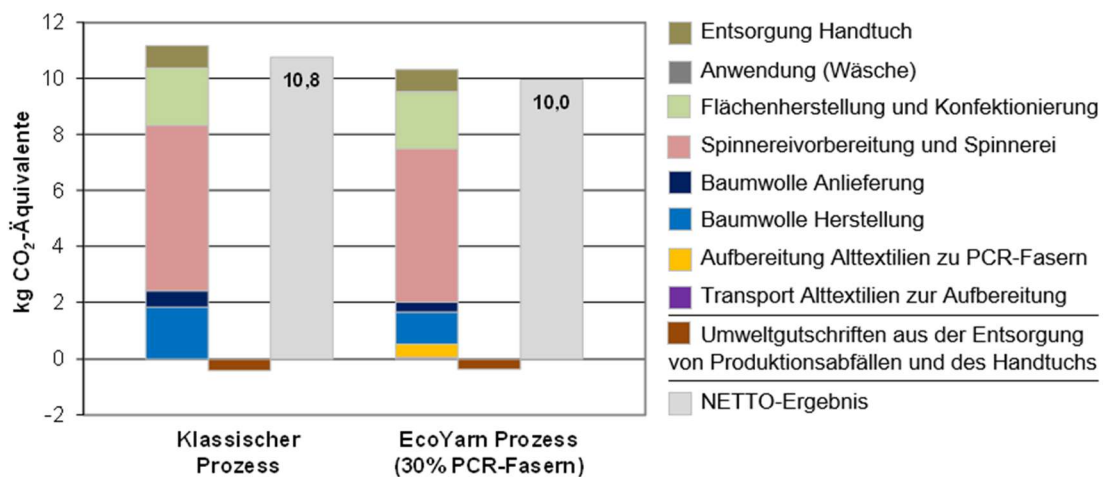


Abbildung 10: Wirkungskategorie Klimawandel – Vergleich der Szenarien bezogen auf die Herstellung eines Frottiertuchhandtuchs

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. fasst den aggregierten Ökologie-Index, der die verschiedenen Wirkungskategorien zusammen. Das Szenario ECO YARN Prozess weist mit 0,14 Punkten einen geringeren Gesamtwert auf als der klassische Prozess mit 0,17 Punkten. Der überwiegende Anteil der bilanzierten Umweltwirkungen entfällt auf wenige zentrale Wirkungskategorien. Dazu zählen insbesondere klimarelevante Emissionen, der Verbrauch fossiler Energieträger, wasserbezogene Belastungen sowie stoffeintragsbedingte Effekte in aquatischen Ökosystemen.

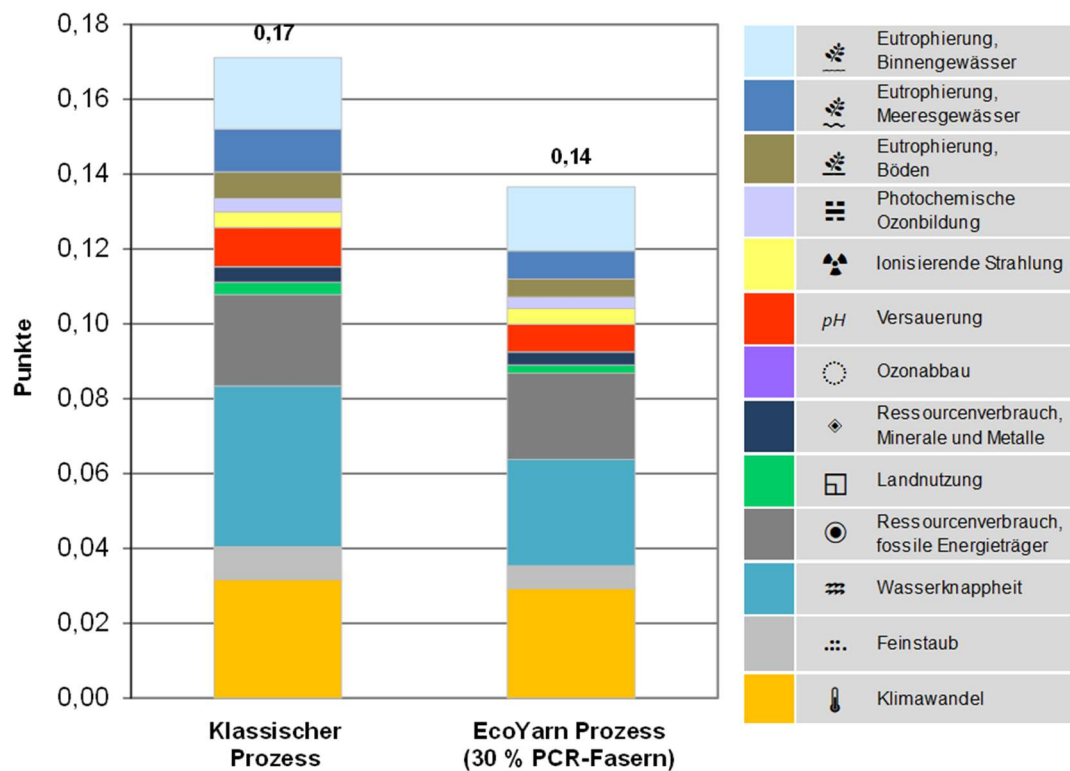


Abbildung 11: Ökologie-Index – Vergleich der Szenarien bezogen auf die Herstellung eines Frottierhandtuches

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse, dass der Einsatz von PCR-CO in der betrachteten Anwendung zu einer messbaren Reduktion der Umweltwirkungen führt. Eine detaillierte Darstellung der methodischen Annahmen, Einzelprozesse und weiteren Wirkungskategorien ist dem vollständigen Ökobilanzbericht im Anhang zu entnehmen.

2.6.4 Interpretation der Ergebnisse im Projektkontext

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse sind vor dem Hintergrund der im Projekt gewählten praxisnahen Prozessbedingungen zu interpretieren. Die bilanzierten Umweltwirkungen basieren teilweise auf Labor- und Technikumsprozessen mit geringem Durchsatz sowie auf Prozessführungen, die durch Instabilitäten, wie Fadenbrüche und daraus resultierende Stillstände, geprägt sind. Diese Randbedingungen führen zu erhöhten spezifischen Energieverbräuchen.

Insbesondere der im Projekt beobachtete hohe Ausschuss beim Reißprozess von rund 35 % wirkt sich negativ auf die ökobilanzielle Bewertung aus, da zur Bereitstellung der erforderlichen Fasermenge ein entsprechend erhöhter Material- und Energieeinsatz notwendig ist. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass bei einer stabileren Prozessführung, reduzierten Ausschussraten und höheren Durchsätzen eine weitere Reduktion der Umweltwirkungen möglich ist.

Vor diesem Hintergrund verdeutlicht die Ökobilanz nicht nur die ökologischen Vorteile der teilweisen Rückführung von Baumwollfasern in den textilen Kreislauf, sondern zeigt zugleich konkrete Ansatzpunkte für eine ökologische und technische Weiterentwicklung der Prozesskette auf. Die Ergebnisse unterstreichen damit das Potenzial des Recyclingansatzes und liefern eine belastbare Grundlage für weiterführende Optimierungs- und Skalierungsuntersuchungen.

3 Fazit

Im vorliegenden Projekt wurde die technische Machbarkeit der Herstellung eines Frottierhandtuchs aus Alttextilien des Mietwäschesektors erfolgreich demonstriert. Entlang der gesamten textilen Prozesskette, von der Sortierung über das Reißen, die Faseraufbereitung, das Verspinnen und Verweben bis hin zur Konfektionierung, konnte ein funktionsfähiger Demonstrator entwickelt werden. Ergänzend wurde der Herstellungsprozess im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse bewertet und mit einem konventionellen Herstellungsprozess mit Virgin-Baumwolle verglichen, wodurch das ökologische Potenzial der Substitution von Primärbaumwolle belegt werden konnte.

Die entwickelte Sortiervorschrift erlaubt eine reproduzierbare Identifikation geeigneter Alttextilien als Rohstoffbasis. Besonders hervorzuheben ist die systematische Optimierung des Reißprozesses als qualitätsbestimmender Ausgangsschritt. Durch umfangreiche Screeningversuche konnte eine maximale mittlere Faserlänge unter definierten Prozessbedingungen ermittelt werden. Trotz Optimierung konnte eine Ausschussrate von rund 35 % nicht unterschritten werden. In der nachgelagerten Vorreinigung und Kardierung wurden zusätzlich etwa 14 % Materialverluste identifiziert. Damit wird deutlich, dass der mechanische Recyclingansatz derzeit mit erheblichen Masseverlusten verbunden ist.

Zudem wurde ein geeignetes Mischungsverhältnis aus 30 % PCR-CO zu 70 % VIR-CO bestimmt, dass die geforderten mechanischen Garnkennwerte erreicht. Ein höherer Anteil an Recyclingfasern wurde hinsichtlich der hohen Qualitätsansprüche an das Garn verworfen. Trotz Erreichen der Mindestkennwerte blieben qualitätsrelevante Einschränkungen bestehen, darunter erhöhte Haarigkeit und Ungleichmäßigkeiten im Garn. Die häufig angenommene höhere Robustheit des Rotorspinnens gegenüber Kurzfaserteilen konnte im vorliegenden Materialkontext nicht eindeutig bestätigt werden. Dies verdeutlicht den Bedarf an einer systematischen Bewertung unterschiedlicher Spinntechnologien unter definierten Material- und Prozessbedingungen.

Auch im Webprozess zeigten sich materialbedingte Herausforderungen. Erhöhte Fadenbruchraten führten zu Maschinenstillständen und beeinflussten sowohl die Prozesseffizienz als auch die spezifischen Energieverbräuche. Damit wurde deutlich, dass die Faserqualität nicht nur die Garnkennwerte, sondern maßgeblich die Stabilität der nachgelagerten Flächenherstellung bestimmt.

Das hergestellte Frottierhandtuch erfüllte die definierten konstruktiven Anforderungen und konnte optisch bewertet werden. Umfangreiche Gebrauchstests oder eine erneute Rezyklierung nach der sekundären Nutzungsphase konnten aufgrund der Komplexität und des zeitlichen Aufwands des Herstellungsprozesses nicht realisiert werden. Diese Arbeiten sollten in anknüpfenden Projekten durchgeführt werden.

Die Lebenszyklusanalyse zeigt, dass der ECO YARN Prozess mit 30 % PCR-CO gegenüber dem klassischen Virgin-Prozess in allen betrachteten Wirkungskategorien öko-

logisch überlegen ist. Das Treibhauspotenzial reduzierte sich von 10,8 kg CO₂-Äquivalenten (Virgin-Prozess) auf 10,0 kg CO₂-Äquivalente je Handtuch. Auch der aggregierte Ökologie-Index fiel mit 0,14 Punkten 17 % niedriger aus als beim Referenzprozess (0,17 Punkte). Die größten Umweltwirkungen entfielen in beiden Szenarien auf die Spinnereivorbereitung und Spinnerei (ca. 53 %). Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die Bilanz auf Technikumsbedingungen mit erhöhtem Energieeinsatz, Prozessinstabilitäten und hohem Ausschuss basiert. Insbesondere die 35 % Materialverluste im Reißprozess wirken sich negativ auf die Umweltbilanz aus. Es ist davon auszugehen, dass bei stabilerer und verbesserter Prozessführung, höherem Durchsatz und reduzierten Stillständen zusätzliche ökologische Verbesserungen erreichbar sind. Die LCA verdeutlicht somit zweierlei:

- Der Recyclingansatz besitzt bereits unter nicht-optimierten Bedingungen ein starkes messbares, ökologisches Potenzial.
- Technische Optimierungen versprechen eine weitere signifikante Reduktion der Umweltwirkungen.

Des Weiteren wurden im Projekt mehrere strukturelle Zielkonflikte sichtbar:

- Zwischen Fasererhalt und Durchsatz im Reißprozess
- Zwischen Recyclingfaseranteil und erreichbarer Garnqualität
- Zwischen Prozessstabilität und Energieverbrauch
- Zwischen Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit

Insbesondere der hohe Kurzfaseranteil führte zu Faserflug, Staubentwicklung und Maschinenstillständen in Spinnerei und Weberei. Dies beeinflusst nicht nur die Garnqualität, sondern auch die Produktionssicherheit, den Parallelbetrieb weiterer Linien und damit die wirtschaftliche Tragfähigkeit.

Aus den Ergebnissen ergeben sich klar definierte Forschungsfelder:

- Erhöhung des Durchsatzes und Reduktion des Ausschusses im Reißprozess
- Detaillierte Analyse der Faserschädigung im Vergleich zu Primärfasern
- Gezielte Optimierung des Kardierprozesses für sekundäre Baumwollfasern
- Entwicklung geeigneter Spinnmittel zur Reduktion von Faserflug und Verbesserung der Spinnstabilität
- Systematische Untersuchung unterschiedlicher Stapellängen und Mischungsverhältnisse im Hinblick auf Qualität und Wirtschaftlichkeit
- Technologischer Benchmark alternativer Spinnverfahren

Ziel zukünftiger Arbeiten muss es sein, den Recyclinganteil substantiell zu erhöhen und gleichzeitig Prozessstabilität, Qualität und Wirtschaftlichkeit sicherzustellen.

Das Projekt stellt einen wesentlichen Grundbaustein für die Weiterentwicklung mechanischer Textilrecyclingprozesse dar. Die technische Machbarkeit wurde nachgewiesen, ökologische Vorteile konnten quantifiziert werden und zentrale prozesstechnische Herausforderungen wurden identifiziert.

Während die ökologische Vorteilhaftigkeit bereits unter suboptimalen Bedingungen belegt werden konnte, ist die industrielle Skalierung maßgeblich von einer ganzheitlichen Prozessoptimierung abhängig. Die identifizierten Defizite bilden dabei keinen Rückschritt, sondern eine klare Forschungsagenda zur Stabilisierung und wirtschaftlichen Implementierung geschlossener textiler Stoffkreisläufe.

4 Literaturverzeichnis

- [BL22] Stephan Baz, Johannes Leis,
Rohstoffklassifizierung_Präsentation_STFI_DITF_18-05-2022
15. Kolloquium „re4tex“: Vortrag am 18. Mai 2022, Chemnitz
- [BCC24] Buck, T.; Cherdrón, B.; Cetin, M.:
Challenges and Opportunities in Mechanical Textile Recycling: Focus on
Carding for High-Quality Yarn Production – RezyCycle (Poster)
Aachen Dresden Denkdorf International Textile Conference, 2024
- [Dit22] DiTex-Kreislaufwirtschaft
Projektplattform: <https://www.ditex-kreislaufwirtschaft.de/projekt/2022>
- [Dur03] Pinar N. Duru, Osman Babaarslan
Determining an Optimum Opening Roller Speed for Spinning Polyester/Waste Blend Rotor Yarns
Textile Research 73, October 2003
- [Eil17] Ellen MacArthur Foundation
A new textiles economy: Redesigning fashion's future
2017
- [Has10] Hasani, H; Semnani, D.
Determining the Optimum Spinning Conditions to Produce the Rotor Yarns from Cotton Wastes
Industria textile, 2010
- [KÄR25] Kärkkäinen, E. et al.
Characterisation of Fibre Mechanical Recycled Cotton Denim Fibres and the Effects of Their Properties on Yarns and Knits.
Recycling, MDPI, 2025.
- [LIN24] Linthout, J.; Woerner, C.:
Uster AFIS Pro 2 – Guidelines for testing recycled cotton fibers.
Aachen Dresden Denkdorf International Textile Conference, 2024.
- [Ott24] Gebr. Otto Baumwollfeinzwirner GmbH + Co.KG
recot²®
https://www.otto-garne.com/media/pages/eigenmarken/1cdbe4d42f-1737560848/recot2_de.pdf, Zugriff 30.01.2026
o. D.

- [Säc24] Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI)
Projektplattform: <https://www.re4tex-netzwerk.de/>, Zugriff 11.03.2024
- [SCHW22] Schwippl, H.
Recycling Standards and Classification
ITMF ICCTM Progress Report, 2022.
- [Sen19] Sengpiel-Bender, N.;
Pressemitteilung: INTERREG-Projekt zum Mischfaser-Recycling gestartet, Konsortium unter Leitung von imat-uve entwickelt industriellen Standard für Garne aus Alttextilien
https://www.imat-uve.de/hubfs/PDF%20Presse_News_Events/Interreg_imat-uve_DE.pdf, Zugriff 11.02.2026
2019
- [Ste22] Stegschuster, G.
Efficient approach to more successful textile recycling
Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH
- [UST25] Uster Technologies AG
Uster AFIS Pro 2 – Guidelines for testing mechanically recycled cotton fibers.
Application Report, 2025
- [Vei16] Veit, D.
Textiltechnik 1
14. Aufl.
Aachen: Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen, 2016
- [Wra19] Wrap
ECAP – European Clothing Action Plan
<https://wrap.org.uk/sites/default/files/2021-03/WRAP-ECAP-Summary-Report%202019-Driving-circular-fashion-and-textiles.pdf>, Zugriff
13.02.2026
2019

5 Anhang

Anhang 1: Anforderungskatalog für das Frottierhandtuch

Materialanforderungen		
Merkmal	Spezifikation	Prüfmethode
Faserzusammensetzung	VIR-CO: 70 % PCR-CO: 30 %	Nicht prüfbar
Mittlere Faserlänge l(n) [mm]	VIR-CO: mind. 18 mm PCR-CO: mind. 10 mm	AFIS PRO 2, Uster Technologie AG, Schweiz
Garntechnische Anforderungen		
Merkmal	Spezifikation	Prüfmethode
Garnfeinheit	Nm 27/1 Nm 41/2	Uster Tester 6, Uster Technologie AG, Schweiz ISO 2060, DIN 53 830
Garnfestigkeit	17 cN/tex	Uster Tester 6, Uster Technologie AG, Schweiz
Garngleichmäßigkeit	20 %	Uster Tester 6, Uster Technologie AG, Schweiz ISO 16549
Garndrehung	560 T/m	Uster Tester 6, Uster Technologie AG, Schweiz
Struktur- und Fertigungsanforderungen		
Merkmal	Spezifikation	Prüfmethode
Gewebestruktur	Walk-Frottier	-
Kettfaden	Nm 27/1	Uster Tester 6, Uster Technologie AG, Schweiz ISO 2060, DIN 53 830
Schussfaden	Nm 41/2	Uster Tester 6, Uster Technologie AG, Schweiz ISO 2060, DIN 53 830
Flächengewicht	Ca. 450 g/cm ²	ISO 3801

Polschlaufenlänge	12 mm	Messung mittels Messlupe
Haptik	Weicher Griff	Haptische Bewertung
Designanforderungen		
Merkmal	Spezifikation	Prüfmethode
Farbton	Weiß und Salbei	Sichtprüfung
Maße	140 mm x 70 mm	ISO 22198
Oberflächenhomogenität	Gleichmäßige Florverteilung	Sichtprüfung
Optische Merkmale	Bordüre (140 mm x 4,5 mm)	Sichtprüfung
Kantenausführung	Mehrfach ver- nähte Säume	Sichtprüfung
Naht	Polyester: 100 %	Sichtprüfung

Anhang 2: Anforderungskatalog an den Prozess zur Herstellung des Frottierhandtuchs

Prozessschritt	Prozessanforderung	Aggregatzu- stand	Maschine	Spezifikation	Input, gerundet [kg]	Output [kg]	Verlust [%]
Sammeln und Sortieren	Sicherstellung einer sortenreinen Materialbasis	Flächenware	Manuell	100 % CO Handtücher, Bett- und Tischwäsche	1000 kg		-
Störstoffentfernung	Entwicklung nicht-textiler Bestandteile	Flächenware	Manuell	Frei von Knöpfen, Reißverschlüssen und Etiketten	500 kg		-
Zuschnitt	Vorbereitung für reproduzierbares Aufreißen	Flächenware	Schneidmaschine	Stückgröße ca. 40 mm x 40 mm	465 kg		0,5 %
Reißen	Erzeugung spinnfähiger Recyclingfasern	Reißfasern	Reißmaschine	Mittlere Faserlänge ≥ 10 mm	460 kg		35 %

Kardieren	Mischung von Reiß- und Virginfasern Bildung eines gleichmä- ßigen Kardenbands	Kardenband	Krempelwolf Vorreiniger Karde	Reinigung und Homogenisie- rung des Fa- sermaterials Kardenband 5 ktex	340 kg		14 %
Strecken	Homogenisierung des Faserbandes	Streckband	Regulierungs- strecke	Doublierun und 6- fache Ver- streckung Streckband 5 ktex	303 kg		3 %
Flyern	Verstreckung und Dre- hungsaufgabe zur Vor- garnherstellung	Vorgarn	Flyer	Vorgarn Nm 1	294 kg		5 %
Spinnen	Herstellung eines ver- webbaren Garns	Garn	Ringspinnma- schine	Garn gemäß Produktanfor- derung mit ei- ner Feinheit von Nm 27/1 und Nm 41/1	280 kg		13,5 %
Zwirnen	Herstellung eines Zwirns für die Verwendung als Kettgarns	Zwirn	Zwirnma- schine	Zwirn mit einer Feinheit von Nm 41/2	-		-

Zetteln und Schären	Vorbereitung der Kette für den Webprozess	Kettgarn	Zettelmaschine Schärmaschine	Parallelisierung, Längengleichheit und Spannungshomogenität	-		-
Schlichten	Verbesserung der Webfähigkeit	Kettgarn	Schlichtemaschine	Auftrag eines Schlichtemittels zur Reduktion von Fadenbrüchen	243 kg		-
Weben	Herstellung eines Polgewebes	Rohgewebe	Jacquard Webmaschinen	Walk-Frottier	207 kg		15 %
Gewebekontrolle	Erkennung von Webfehlern	Rohgewebe	Manuell	Fehlerfreies Gewebe	207 kg		-
Ausrüstung	Einstellung der optischen und funktionalen Gewebeeigenschaften	Fertigware	Haspelkufe	Färbung	207 kg		-
Konfektionieren	Herstellung gebrauchsfertiger Handtücher	Endprodukt	Konfektionstechnik Industrienähmaschine	Maße gemäß Produktionsdefinition 140 mm x 70 mm	207 kg		-

Anhang 3: Ergebnisse der Garnherstellung THA zur Gleichmäßigkeit inklusive Einzelergebnisse

Nr.	Abs. Feinheit (Nm)	H	sh	S3u (/100m)	S1+2u (/100m)	2DØ (mm)	CV2D 8mm (%)	CV2D 0,3mm (%)	CV FS (%)	Form	D (g/cm ³)
1	26,86	8,84	2,23	6.709	24.787	0,344	17,67	21,57	12,38	0,81	0,4
2	26,96	8,25	2,09	5.453	22.639	0,339	17,14	20,9	11,96	0,81	0,41
3	26,38	8,09	1,98	4.663	21.606	0,341	16,42	20,23	11,81	0,81	0,42
4	26,63	8,77	2,16	6.026	22.421	0,344	17,04	20,98	12,25	0,82	0,4
5	26,56	8,55	2,09	5.716	22.671	0,342	15,99	20	12,02	0,81	0,41
6	26,59	8,58	2,22	6.859	22.970	0,342	17,38	21,15	12,04	0,81	0,41
7	25,96	8,23	2,08	5.030	22.562	0,342	17,45	21,13	11,91	0,82	0,42
8	26,44	8,85	2,24	7.080	26.029	0,348	17,01	21,09	12,47	0,81	0,4
9	26,27	8,32	2,16	5.599	21.791	0,346	17,11	20,95	12,08	0,81	0,41
10	26,53	8,95	2,25	7.893	24.784	0,347	16,51	20,62	12,35	0,81	0,4
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Mittelwert	26,52	8,54	2,15	6.103	23.226	0,343	16,97	20,86	12,13	0,81	0,41
CV	1,1	3,6	4,1	17	6	0,8	3,1	2,2	1,8	0,5	1,8

Anhang 4: Ergebnisbericht - Ökobilanzielle Bewertungen im Vorhaben ECO YARN

Der Bericht ist ab der nächsten Seite im Original zu entnehmen.

Ergebnisbericht

Projekttitle **Ökobilanzielle Bewertungen im Vorhaben ECO YARN**

Auftraggeber **Technische Hochschule Augsburg**

Projekt-Nr. **930601**

Bearbeiter **René Peche
Thorsten Pitschke**

Augsburg, 10.02.2026

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	1
1 Veranlassung	2
2 Methodik ökobilanzielle Betrachtung.....	2
2.1.1 Zieldefinition	2
2.1.2 Sachbilanz	2
2.1.3 Wirkungsabschätzung.....	3
2.1.4 Zusammenführung der Einzelergebnisse zum Ökologie-Index	4
3 Untersuchungsrahmen	4
3.1 Untersuchungsgegenstand.....	4
3.1.1 Erkenntnisinteresse	6
3.1.2 Funktionelle Einheit	6
3.1.3 Systemgrenze.....	6
4 Beschreibung der Bilanzierungsmodelle.....	7
4.1 Szenario ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern).....	7
4.2 Szenario Klassischer Prozess	8
5 Analyse der Umweltwirkungen.....	10
5.1 Klimawandel.....	10
5.2 Weitere Wirkungskategorien.....	12
5.3 Ökologie-Index.....	13
Literatur	14
Anhang A: Zusammenführung ökologischer Einzelergebnisse zum Ökologie-Index.....	15
Anhang B: Datenlücken, Annahmen, Abschneidekriterien und Verrechnung von Gutschriften	18
Anhang C: Erläuterungen zur Darstellung der Ergebnisse.....	20

Zusammenfassung

Untersuchungsgegenstand

Gegenstand des von der Deutsche Bundestiftung Umwelt geförderten Vorhaben ECO YARN war die Entwicklung eines hochwertigen Ringgarns mit einem Anteil an Post Consumer Recycling (PCR) Baumwolle von 30 Gew.-%. Im Rahmen dieses Vorhabens hat die bifa Umweltinstitut GmbH (bifa) ökobilanzielle Analysen im Unterauftrag für die THA durchgeführt.

Ziel dieser Untersuchung war der ökobilanzielle Vergleich eines Frottierhandtuchs mit einem 30 %igen Anteil Post Consumer Recycling Fasern (PCR-Fasern) und einem klassisch, ausschließlich aus Primärbaumwollfasern hergestelltem Frottierhandtuch in einem „cradle-to-grave“ Ansatz. Damit umfasst die Systemgrenze die Herstellung der Ausgangsmaterialien PCR-Fasern und Baumwollfasern, die Herstellung der Frottierhandtücher und deren Wäsche während der der Anwendungsphase sowie nach der letzten Anwendung die Entsorgung der Frottierhandtücher.

Umweltwirkungen

Für die Wirkungskategorie Klimawandel (in diesem Bericht detailliert dargestellt), können die Ergebnisse der beiden Produktvarianten wie folgt zusammengefasst werden:

- Das Frottierhandtuch mit einem 30 %igen Anteil PCR-Fasern schneidet in der Wirkungskategorie Klimawandel besser ab, als das Frottierhandtuch ausschließlich aus Primärbaumwollfasern.
- Bei beiden Produktvarianten werden die Emissionen vor allem durch die Spinnereivorbereitung und Spinnerei bestimmt. Ungefähr 53 % der klimarelevanten Emissionen entfallen auf diesen Prozessschritt. Weitere Prozessschritte mit Anteilen größer 10 % sind die Flächenherstellung und Konfektionierung (18 % und 20 %) sowie die Herstellung der Baumwolle in Spanien (11 % und 16 %).
- Klima-Gutschriften vor allem aus der thermischen Verwertung vom Produktionsreststoffen sowie der Handtücher nach der letzten Anwendung reduzieren die Umweltbelastungen für beide Varianten jeweils um ca. 3,5 %.

Aussagen, welche Produktvariante ökologisch besser abschneidet, sollten jedoch nicht nur anhand einer einzigen Wirkungskategorie erfolgen. Eine Auswertung aller untersuchten Wirkungskategorien ist wesentlich aussagekräftiger. Das geschieht in dieser Studie über den Ökologe-Index, in welchem die Einzelergebnisse der 13 Wirkungskategorien zu einem dimensionslosen „Single Score“ zusammengeführt werden.

Aus Sicht der umweltbezogenen Bewertung ist das Frottierhandtuch mit einem 30 %igen Anteil PCR-Fasern in allen Umweltwirkungen vorteilhafter als das ausschließlich aus Baumwollfasern hergestellte Frottierhandtuch. Zurückzuführen ist das auf die vermiedene Herstellung von Baumwollfasern inklusive dem Transport aus Spanien nach Deutschland aufgrund der Substitution durch PCR-Fasern sowie dem damit verbundenen geringeren Strombedarf bei der Spinnereivorbereitung und Spinnerei.

1 Veranlassung

Die Deutsche Bundestiftung Umwelt fördert das Vorhaben „Entwicklung von Ringgarn aus Post- Consumer-Recycling Baumwolle (ECO YARN)“, welches durch die Technische Hochschule Augsburg gemeinsam mit Partnern aus Deutschland und der Schweiz beantragt wurde. Im Rahmen dieses Vorhabens hat die bifa Umweltinstitut GmbH (bifa) ökobilanzielle Analysen im Unterauftrag für die THA durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit diesem Bericht vorgelegt.

2 Methodik ökobilanzielle Betrachtung

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte ökobilanzielle Betrachtung orientiert sich an den Normvorgaben zur Durchführung von Ökobilanzen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 [DIN 2021a, DIN 2021b]. Ausgehend von der Zieldefinition im Rahmen der Sachbilanz sind relevante Parameter erfasst und in der Wirkungsabschätzung hinsichtlich ihrer Umweltwirkung zusammengefasst worden. Anschließend wurden die Ergebnisse ausgewertet und interpretiert. Abbildung 2.1 gibt einen schematischen Überblick zum grundsätzlichen Aufbau einer Ökobilanz und zu deren Anwendungsfeldern.

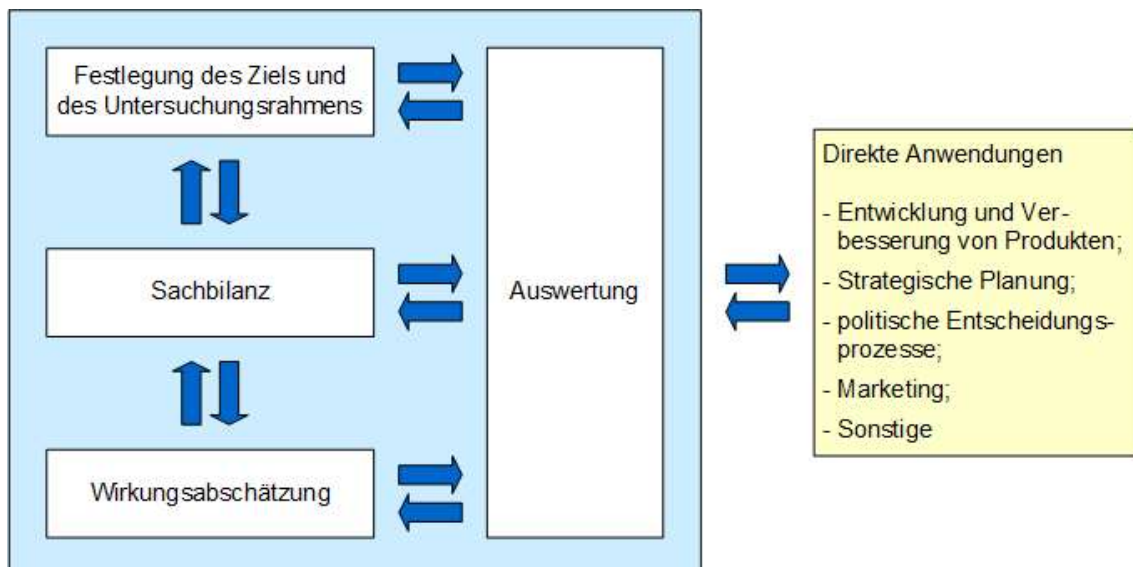


Abbildung 2.1: Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und deren Anwendungsfelder

2.1.1 Zieldefinition

Zur Zieldefinition gehören die Formulierung des Erkenntnisinteresses sowie die Festlegung der funktionellen Einheit und der Systemgrenzen (vgl. Abschnitte 3.1.1 bis 3.1.3).

2.1.2 Sachbilanz

Die Erstellung der Sachbilanz beinhaltet das Sammeln, die Ableitung und die Aufbereitung prozessspezifischer In- und Outputdaten, die System- und Prozessmodellierung sowie die Berechnung der Sachbilanzen. Letztere quantifizieren In- und Outputflüsse des kompletten Bilanzierungssystems oder spezifischer Teil- und Äquivalenzsysteme. Die Sachbilanzen sind Grundlage für die Wirkungsabschätzung und die Auswertung.

Wesentlich für die Datenerhebung und die darauf basierende Bilanzierung ist die Modellierung der Produktsysteme. Dafür ist es erforderlich, die für das jeweilige Systemmodell relevanten

Prozesse zu identifizieren und die notwendigen Sachbilanzdaten zu erheben oder abzuleiten. Das Systemmodell bildet die Basis für die Datenerhebung, die Systemkalkulation, und alle anschließenden Auswertungsschritte. Die Modellierung und Bilanzierung erfolgte mit einer professionellen Bilanzierungssoftware.

2.1.3 Wirkungsabschätzung

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung werden die Ergebnisse der Sachbilanz komprimiert und für die Auswertung vorbereitet. Dazu werden die Sachbilanzergebnisse möglichst (potenziellen) Umweltwirkungen zugeordnet und innerhalb von Wirkungskategorien zu aggregierten Werten verrechnet.

Die Auswahl der verwendeten Wirkungskategorien orientiert sich an den aktuellen umweltbezogenen Kenntnissen sowie am projektspezifischen Erkenntnisinteresse, wobei von den von der Europäischen Kommission und dem Joint Research Centre der Europäischen Kommission empfohlenen Wirkungskategorien und Methoden [EU 2021, JRC 2023] ausgegangen wird. Toxizitätsbezogenen Wirkungskategorien (Human- und Ökotoxizität) werden nicht berücksichtigt, da diese Wirkungskategorien im Kontext des Environmental Footprint (EF) derzeit nicht als ausreichend robust angesehen werden, um in einer externen Kommunikation oder in einem gewichteten Ergebnis berücksichtigt zu werden.

Den einzelnen Wirkungskategorien sind jeweils Sachbilanzparameter zuzuordnen. Die entsprechenden Sachbilanzergebnisse werden anschließend zu einem oder mehreren Wirkungsindikatorergebnissen verrechnet. Tabelle 2.1 zeigt die betrachteten Wirkungskategorien sowie die den Wirkungsindikator kennzeichnende Einheit der Ergebnisse.

Tabelle 2.1: Auswahl der Wirkungskategorien, Einheit der Wirkungsindikatorergebnisse und Klassifizierung der Methodik nach JRC 2023

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Einheit	Klassifizierung ¹⁾
Klimawandel	Erderwärmungspotenzial (GWP100)	kg CO ₂ -Äquivalente	I
Feinstaubbelastung mit anorganischen Emissionen	Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit	Krankheitsinzidenz	I
Wasserknappheit	Wassermangelpotenzial der Nutzer (Wasserverbrauch gewichtet nach Deprivation)	m ³ Wasser-Äquivalente	III
Ressourcenverbrauch, fossile Energieträger	Abiotische Ressourcenerschöpfung – fossile Brennstoffe (ADP-fossil)	MJ	II
Landnutzung ²⁾	Bodenqualitätsindex	Pt ³⁾	III
Ressourcenverbrauch, Minerale und Metalle	Abiotische Ressourcenerschöpfung (ADP Gesamtausbeute)	kg Sb-Äquivalente	II
Ozonabbau	Ozonabbaupotenzial (ODP)	kg CFC-11-Äquivalente	I
Versauerung	Kumulierte Überschreitung (AE)	mol H ⁺ -Äquivalente	II
Ionisierende Strahlung	Wirkungsgrad der Exposition des Menschen gegenüber U235	kBq U235-Äquivalente	II
Fotochemische Oxidantienbildung	Anstieg der Konzentration troposphärischen Ozons	kg NMVOC-Äquivalente	II
Eutrophierung, Böden	Kumulierte Überschreitung (AE)	mol N-Äquivalente	II
Eutrophierung, Meeresgewässer	Nährstoffanteil, der in das Meeres-Endkompartiment gelangt (N)	kg P-Äquivalente	II

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Einheit	Klassifizierung ¹⁾
Eutrophierung, Binnengewässer	Nährstoffanteil, der in das Süßwasser-Endkompartiment gelangt (P)	kg N-Äquivalente	II

1) Einteilung der empfohlenen Charakterisierungsmodelle und zugehörigen Charakterisierungsfaktoren [JRC 2011]:

- I: empfohlen und
- II: empfohlen, aber einige Verbesserungen nötig
- III: empfohlen, aber mit Vorsicht anzuwenden

2) Ergebnis einer Aggregation der vier vom LANCA-Modell zur Bewertung der Auswirkungen von Landnutzung bereitgestellten Indikatoren biotische Produktion, Erosionsbeständigkeit, Mechanische Filterung und Grundwasserauffüllung

3) Pt = Points = Dimensionsloser aggregierter Index von:

- kg biotische Produktion / (m² * a)
- kg Boden / (m² * a)
- m³ Wasser / (m² * a)
- m³ Grundwasser / (m² * a)

2.1.4 Zusammenführung der Einzelergebnisse zum Ökologie-Index

Für einen ökologischen Gesamtvergleich ist es hilfreich, die Wirkungsindikatorergebnisse in ihrer Bedeutung vor dem Hintergrund einer definierten Belastungssituation einzuordnen. Dazu werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung in drei Stufen nach der Environmental Footprint Methodology der EU [Sala 2018a, Andreasi Bassi 2023] zu einem Ökologie-Index zusammengefasst:

1. Normierung der Wirkungsindikatorergebnisse zu Einwohnerwerten
2. Gewichtung der Wirkungskategorien
3. Zusammenführung der normierten und gewichteten Ergebnisse zum Ökologie-Index

Die Vorgehensweise innerhalb der drei Stufen ist im Anhang A beschrieben.

Der Ökologie-Index erlaubt es, für jedes Produktsystem mit mindestens zwei Szenarien das jeweils ökologisch vorteilhafte Produkt zu identifizieren.

3 Untersuchungsrahmen

3.1 Untersuchungsgegenstand

Gegenstand des von der Deutsche Bundestiftung Umwelt geförderten Vorhaben ECO YARN war die Entwicklung eines hochwertigen Ringgarns bei einem Anteil an Post Consumer Recycling (PCR) Baumwolle von 30 Gew.-%. Dazu wurden die Prozesse des mechanischen Textilrecyclings sowie der Spinnereivorbereitung und Spinnerei für die Verarbeitung von PCR-Baumwolle weiterentwickelt. Darüber hinaus erfolgte der Transfer der Ergebnisse in einen realen Kreislauf. Dazu wurde exemplarisch ein Stoffkreislauf im Bereich der Mietwäsche, anhand von Frottierhandtüchern, aufgebaut. Durch die Zusammenarbeit der beteiligten Unternehmen ist eine durchgängig zirkuläre, nachhaltige Wertschöpfungskette entstanden (Abbildung 3.1).

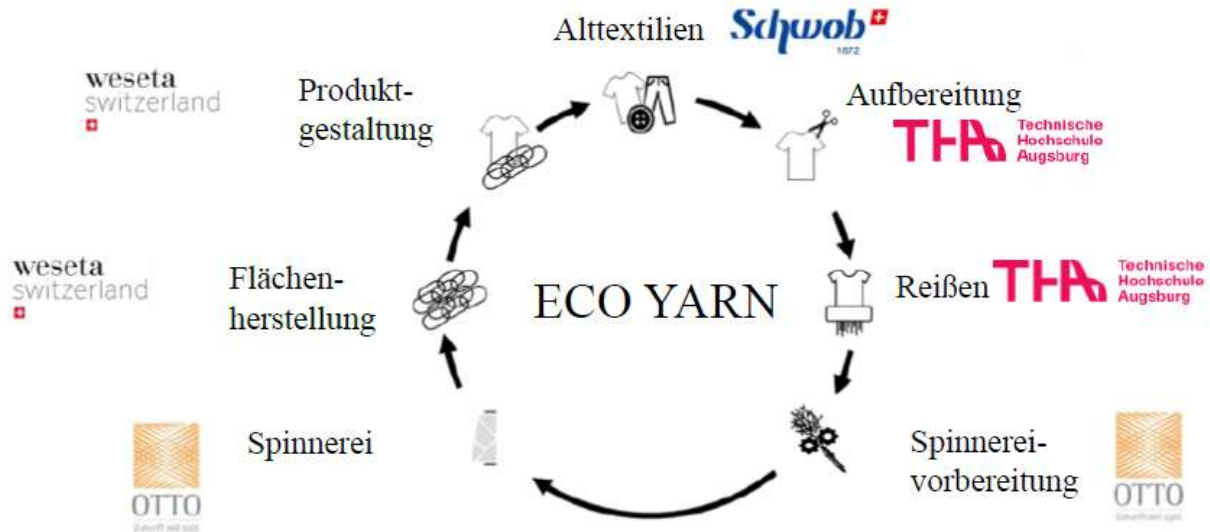


Abbildung 3.1: Kreislauf im Projekt ECO YARN (Quelle: Projektantrag ECO YARN)

Die ökobilanzielle Untersuchung beinhaltet folgende Szenarien

- Szenario *ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern)*: Herstellung eines Frottierhandtuches unter Verwendung von 30 % PCR-Fasern.
- Szenario *Klassischer Prozess*: Herstellung eines Frottierhandtuches unter Verwendung von 100 % primären Baumwollfasern.

Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 zeigen schematisch die Bilanzräume der beiden Szenarien. Die Prozessschritte Ketten, Schichten und Färben waren nicht Teil des Gesamtprojektes und wurden daher nicht betrachtet.

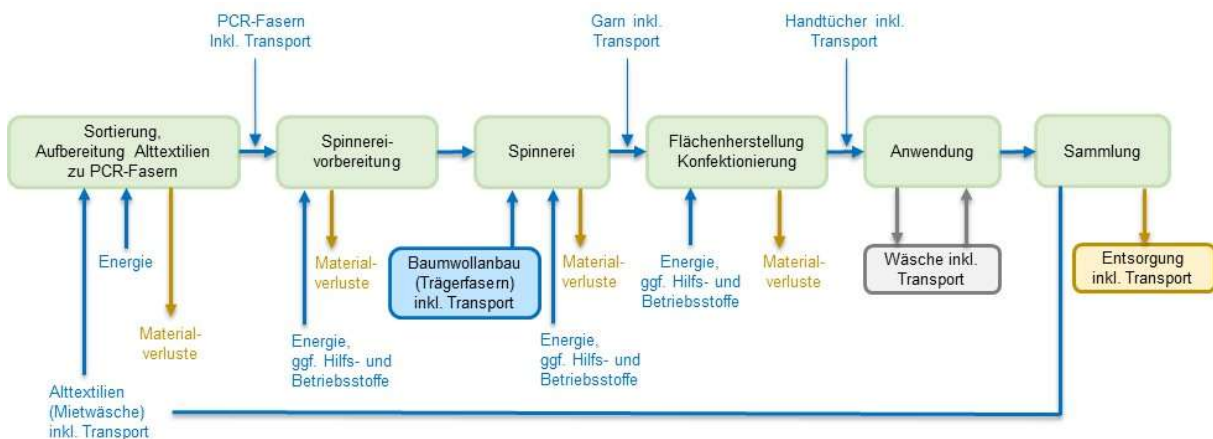


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Bilanzraumes des Szenarios ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern)



Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Bilanzraumes des Szenarios Klassischer Prozess

3.1.1 Erkenntnisinteresse

Durch den ökobilanziellen Vergleich soll folgende Fragestellung beantwortet werden:

- Ist bei einem hochwertigem Ringgarn die Substitution von 30 Gew.-% primärer Baumwollfasern durch PCR-Baumwollfasern mit einer ökologischen Entlastungen der Umwelt verbunden?

3.1.2 Funktionelle Einheit

Die Funktionelle Einheit dient als Referenz sowohl für die Gegenüberstellung der betrachteten Szenarien als auch für die Normierung der in der Sachbilanz ermittelten In- und Outputdaten. Als funktionelle Einheit wird die **Herstellung eines Frottiertuch** festgelegt. Es wird davon ausgegangen, dass Handtücher mit und ohne Anteil PCR-Baumwollfasern funktional identisch sind.

3.1.3 Systemgrenze

Entsprechend DIN EN ISO 14040 legt die Systemgrenze die Prozesse fest, die in das zu modellierende System aufgenommen werden. In dieser Studie ist die Systemgrenze „cradle-to-grave“. Damit werden folgende Prozesse werden innerhalb der Systemgrenzen berücksichtigt:

- Alle Prozesse, beginnend bei der Herstellung und Verarbeitung der Baumwollfasern sowie der Herstellung des Frottiertuchs über dessen Nutzung bis zur Entsorgung nach letztemaligen Gebrauch.
- Die Erzeugung von Strom und Wärme.
- Die Bereitstellung von Wasser.
- Alle Transportvorgänge von der Rohstoffbereitstellung bis zur Entsorgung.
- Alle mit den Prozessen verbundenen relevanten Stoff- und Energieflüsse von der Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen über die Bereitstellung von Betriebsmitteln und Ausgangsprodukten bis zur Behandlung von Produktionsabfällen und Reststoffen.

Der Umgang mit Datenlücken, Annahmen, Abschneidekriterien vor- und nachgelagerter Prozesse und der Umgang mit Gutschriften sind im Anhang B beschrieben.

4 Beschreibung der Bilanzierungsmodelle

4.1 Szenario ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern)

Abbildung 3.2 zeigt schematisch die Teilsysteme im Bilanzierungsmodell des Szenarios *ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern)*.

Das Gesamtgewicht eines Frottierhandtuchs beträgt ca. 1,02 kg. Dieses verteilt sich zu ca. 30 % auf PCR-Fasern und ca. 70 % auf primäre Baumwollfasern. Tabelle 4.1 fasst die Modellparameter der Prozessschritte zusammen.

Tabelle 4.1: Modellparameter für das Szenario ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern)

Prozessschritt	Modellparameter	Wert	Quelle
Aufbereitung Alttextilien zu PCR-Fasern	Schneidmaschine:		THA 2026
	- Strombedarf	0,05 kWh/kg Inputmaterial	
	- Materialverlust ¹⁾	0,5 %	
	Reißmaschine:		
	- Strombedarf	0,369 kWh/kg Inputmaterial	
	- Materialverlust ¹⁾	35 %	
	Krempelwolf:		
	- Strombedarf	0,0033 kWh/kg Inputmaterial	
	- Materialverlust ¹⁾	1 %	
Spinnereivorbereitung und Spinnerei	CLU:		Otto 2024; Schuster 2011
	- Strombedarf	0,0025 kWh/kg Inputmaterial	
	- Materialverlust ¹⁾	5 %	
	Karde:		
	- Strombedarf	0,16 kWh/kg Inputmaterial	
	- Materialverlust ¹⁾	8 %	
	Strecke:		
	- Strombedarf	0,0297 kWh/kg Inputmaterial	
- Materialverlust ¹⁾	3 %		
Flächenherstellung und Konfektionierung	Flyer:		Weseta 2025; Schuster 2011
	- Strombedarf	0,66 kWh/kg Inputmaterial	
	- Materialverlust ¹⁾	5 %	
	Anteil PCR-Fasern	0,3405 kg/kg (30 %)	
Anwendung (Wäsche)	Anteil Baumwollfasern ²⁾	0,795 kg/kg (70 %)	Schwob 2025
	Strombedarf	10,8 kWh/kg Textilfaser	
	Materialverlust ³⁾	13,5 %	
	Textilfasern	1,15 kg/kg Textil	
Anwendung (Wäsche)	Strombedarf	11,1 kWh/kg Textil	Schwob 2025
	Heizölbedarf	4,5 e-4 m ³ /kg Textil	
	Wasserbedarf	1,5 e-3 m ³ /kg Textil	
	Materialverlust ¹⁾	15 %	
	Waschgänge pro Textil	150 bis 200 Waschvorgänge innerhalb von 4 bis 5 Jahren	
Strombedarf	0,152 kWh/kg Wäsche		

Prozessschritt	Modellparameter	Wert	Quelle
	Gasbedarf	1,118 kWh/kg Wäsche	
	Wasserbedarf	0,006 e-3 m ³ /kg Wäsche	
Entsorgung	Thermische Verwertung mit Energiegewinnung:		Annahme; ecoinvent 2024
	- Strom	0,494 kWh/kg Textil	
	- Wärme	9,994 kWh/kg Textil	

1) Annahme: thermische Verwertung mit Energiegewinnung [ecoinvent 2024]

2) Otto 2024: Bezug aus Spanien

Herstellungsprozess über einen Datensatz aus der ecoinvent-Datenbank angenähert [ecoinvent 2024]

3) Otto 2024: 18 % stoffliche Verwertung in Geldscheinpapierherstellung und 82 % thermische Verwertung

Die im Szenario *ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern)* berücksichtigten Transporte sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Tabelle 4.2: Transporte im Szenario *ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern)*

Transport	Transportmittel	Transportentfernung	Quelle
Transport Alttextilien von den Sammelstellen zur Aufbereitung	Lkw	500 km	Annahme
Transport PCR-Fasern von der THA ¹⁾ zu Otto ²⁾	Lkw	105 km	Routenplaner
Transport Baumwollfasern aus Spanien zu Otto	Lkw	2.000 km	Annahme
Transport Garn von Otto zu Westa ³⁾	Lkw	220 km	Routenplaner
Transport Frottierhandtuch von Weseta zu Schwob ⁴⁾	Lkw	190 km	Routenplaner
Transport Frottierhandtuch nach der letzten Anwendung von Schwob zur thermischen Verwertungsanlage	Lkw	50 km	Annahme
Transport Materialverluste zu den thermischen Verwertungsanlagen	Lkw	50 km	Annahme
Transport Materialverluste zur stofflichen Verwertungsanlage	Lkw	700 km	Annahme
Transport Frottierhandtuch nach der letzten Anwendung zur thermischen Verwertungsanlage	Lkw	50 km	Annahme

1) Technische Hochschule Augsburg – Recycling Atelier, Augsburg, Deutschland

2) Gebr. Otto Baumwollfeinzwirnerie GmbH + Co.KG, Dietenheim, Deutschland

3) Weseta Textil AG, Engi, Schweiz

4) Schwob AG, Burgdorf, Schweiz

4.2 Szenario Klassischer Prozess

Abbildung 3.3 zeigt schematisch die Teilsysteme im Bilanzierungsmodell des Szenarios *Klassischer Prozess*.

Das Gesamtgewicht des Frottierhandtuchs wurde mit ca. 1,02 kg angenommen. Dieses ist zu ca. 100 % aus primäre Baumwollfasern hergestellt. Tabelle 4.3 fasst die Modellparameter der Prozessschritte zusammen.

Tabelle 4.3: Modellparameter für das Szenario Klassischer Prozess

Prozessschritt	Modellparameter	Wert	Quelle
Spinnereivorbereitung und Spinnerei	Anteil Baumwollfasern ¹⁾	1,314 kg/kg	Otto 2024; Schuster 2011
	Strombedarf	11,5 kWh/kg Textilfaser	
	Materialverlust ²⁾	31,4 %	
Flächenherstellung und Konfektionierung	Textilfasern	1,15 kg/kg Textil	Weseta 2025; Schuster 2011
	Strombedarf	11,1 kWh/kg Textil	
	Heizölbedarf	4,5 e-4 m ³ /kg Textil	
	Wasserbedarf	1,5 e-3 m ³ /kg Textil	
	Materialverlust ¹⁾	15 %	
Anwendung (Wäsche)	Waschgänge pro Textil	150 bis 200 Waschvorgänge innerhalb von 4 bis 5 Jahren	Schwob 2025
	Strombedarf	0,152 kWh/kg Wäsche	
	Gasbedarf	1,118 kWh/kg Wäsche	
	Wasserbedarf	0,006 e-3 m ³ /kg Wäsche	
Entsorgung	Thermische Verwertung mit Energiegewinnung:		Annahme; ecoinvent 2024
	- Strom	0,494 kWh/kg Textil	
	- Wärme	9,994 kWh/kg Textil	

1) Otto 2024: Bezug aus Spanien

Herstellungsprozess über einen Datensatz aus der ecoinvent-Datenbank angenähert [ecoinvent 2024]

2) Otto 2024: 18 % stoffliche Verwertung in Geldscheinpapierherstellung und 82 % thermische Verwertung

3) Annahme: thermische Verwertung mit Energiegewinnung [ecoinvent 2024]

Die im Szenario *Klassischer Prozess* berücksichtigten Transporte sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Tabelle 4.4: Transporte im Szenario Klassischer Prozess

Transport	Transportmittel	Transportentfernung	Quelle
Transport Baumwollfasern aus Spanien zu Otto ¹⁾	Lkw	2.000 km	Annahme
Transport Garn von Otto zu Westa ¹⁾	Lkw	220 km	Routenplaner
Transport Frottiertertuch von Weseta zu Schwob ¹⁾	Lkw	190 km	Routenplaner
Transport Frottiertertuch nach der letzten Anwendung von Schwob zur thermischen Verwertungsanlage	Lkw	50 km	Annahme
Transport Materialverluste zu den thermischen Verwertungsanlagen	Lkw	50 km	Annahme
Transport Materialverluste zur stofflichen Verwertungsanlage	Lkw	700 km	Annahme
Transport Frottiertertuch nach der letzten Anwendung zur thermischen Verwertungsanlage	Lkw	50 km	Annahme

1) siehe Tabelle 4.2

5 Analyse der Umweltwirkungen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung detailliert exemplarisch anhand der Wirkungskategorie Klimawandel vorgestellt. Der Klimawandel beschreibt die anthropogenen Beiträge zur Erwärmung der Erdatmosphäre (Treibhauseffekt).

Anschließend werden die Ergebnisse aller 13 untersuchten Wirkungskategorien zusammengefasst. Abgeschlossen wird die Auswertung durch den Ökologie-Index, in welchem die Einzelergebnisse aller Wirkungskategorien zu einem dimensionslosen „Single Score“ zusammengeführt werden. Für die graphische Auswertung der Ergebnisse der Wirkungskategorie Klimawandel und des Ökologie-Index werden Darstellungen verwendet, wie im Anhang C erläutert.

5.1 Klimawandel

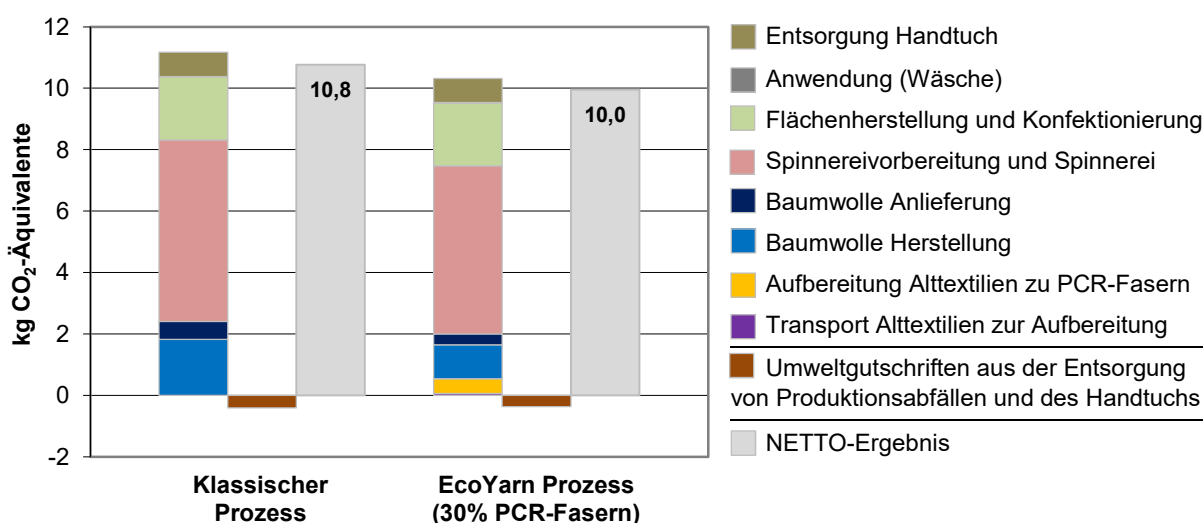


Abbildung 5.1: Wirkungskategorie Klimawandel - Vergleich der Szenarien bezogen auf die Herstellung eines Frottiertuchts

Abbildung 5.1 zeigt, dass der Beitrag zur Belastung der Umwelt mit treibhauswirksamen Gasen (zum größten Teil fossiles CO₂) im Szenario *Klassischer Prozess* höher ist. Damit schneidet das Frottiertuch mit einem 30 %igen Anteil PCR-Fasern in der Wirkungskategorie Klimawandel besser ab, als das ausschließlich aus Baumwollfasern hergestelltes Frottiertuch.

Über den Lebensweg weisen die Szenarien folgende Treibhauspotenziale auf:

- Klassischer Prozess: 10,8 kg CO₂-Äquivalente
- ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern): 10,0 kg CO₂-Äquivalente

Klimabelastung (Brutto-Ergebnis)

In beiden Szenarien werden die Brutto-Ergebnisse vor allem durch die Spinnereivorbereitung und Spinnerei bestimmt. Verantwortlich dafür ist Strombedarf. Ebenfalls relevante, aber niedrigere Anteile an den Brutto-Ergebnissen entfallen auf die Flächenherstellung und Konfektionierung sowie die Herstellung der Baumwolle inklusive dem Transport aus Spanien nach Deutschland. Zurückzuführen sind diese Emissionen hauptsächlich auf die Wärmebereitstellung bzw. auf die Produktion des Saatguts sowie die Herstellung von Düngemittel.

Die Beiträge aller Prozessschritte zu den Brutto-Ergebnissen sowie die wichtigsten Herkunftsquellen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Wirkungskategorie Klimawandel - Beiträge der Teilsysteme (Sektoren) zu den Brutto-Ergebnissen der Szenarien bezogen auf die Herstellung eines Frottierhandtuchs

Teilsystem (Sektor) und Einzelbeiträge	ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern)		Klassischer Prozess	
	[CO ₂ -Äquivalente]			
Transport Alttextilien zur Aufbereitung	0,06 kg	1 %		
Aufbereitung Alttextilien zu PCR-Fasern	0,48 kg	5 %		
· Strombereitstellung	0,27 kg			
· Entsorgung Materialverluste	0,2 kg			
Baumwolle Herstellung	1,1 kg	11 %	1,82 kg	16 %
· Produktion Saatgut	0,58 kg		0,97 kg	
· Herstellung Düngemittel	0,37 kg		0,61 kg	
· Strombereitstellung	0,06 kg		0,09 kg	
Baumwolle Anlieferung	0,35 kg	3 %	0,59 kg	5 %
Spinnereivorbereitung und Spinnerei	5,47 kg	53 %	5,91 kg	53 %
· Strombereitstellung	5,32 kg		5,62 kg	
Flächenherstellung und Konfektionierung	2,06 kg	20 %	2,06 kg	18 %
· Wärmebereitstellung	1,65 kg		1,65 kg	
· Strombereitstellung	0,26 kg		0,26 kg	
· Entsorgung Materialverluste	0,12 kg		0,12 kg	
Anwendung (Wäsche)	< 0,01 kg	< 1 %	< 0,01 kg	< 1 %
Entsorgung Handtuch	0,78 kg	8 %	0,78 kg	8 %

Klimaentlastung

Umweltgutschriften reduzieren die Umweltbelastungen der Szenarien jeweils um ca. 3,5 %.

In beiden Szenarien sind die Umwelt-Gutschriften vor allem auf die Strom- und Wärmeherzeugung bei der thermischen Verwertung von Produktionsreststoffen (Materialverluste) sowie der Handtücher nach der letzten Anwendung zurückzuführen. Dadurch wird die konventionelle Energieerzeugung mit den dazugehörigen treibhauswirksamen Emissionen vermieden.

Darüber resultieren Klimagutschriften auch aus der stofflichen Verwertung von kurzen Baumwollfasern, die als Produktionsreststoff (Materialverlust) bei der Spinnereivorbereitung und Spinnerei anfallen, in der Geldscheinpapierherstellung. Es wird angenommen, dass dadurch auf konventionellem Weg hergestellte Baumwollfasern substituiert und damit verbundene treibhauswirksame Emissionen vermieden werden.

Die Umwelt-Gutschriften sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Wirkungskategorie Klimawandel – Zusammenfassung der Umweltgutschriften der Szenarien bezogen auf die Herstellung eines Frottierhandtuchs

Umweltgutschrift	ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern)		Klassischer Prozess	
	[CO ₂ -Äquivalente]			
Strom aus der thermische Abfallbehandlung	- 0,1 kg	26 %	- 0,08 kg	19 %
Wärme aus der thermische Abfallbehandlung	- 0,21 kg	58 %	- 0,19 kg	48 %
Einsatz von kurzen Baumwollfasern in der Geldscheinpapierherstellung	- 0,06 kg	15 %	- 0,13 kg	33 %

5.2 Weitere Wirkungskategorien

In Tabelle 5.3 sind die Wirkungsindikatorergebnisse aller untersuchten Umweltwirkungen zusammengefasst.

Tabelle 5.3: Wirkungsindikatorergebnisse aller betrachteten Umweltwirkungen bezogen auf die Herstellung eines Frottierhandtuchs

Wirkungskategorie	Indikator (Einheit)	Ergebnis	
		ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern)	Klassischer Prozess
Klimawandel	kg CO ₂ -Äquivalente	10,8	9,95
Feinstaubbelastung mit anorganischen Emissionen	Disease Incidence	5,45E-07	3,80E-07
Wasserknappheit	m ³ Wasser-Äquivalente	54,6	36,1
Ressourcenverbrauch, fossile Energieträger	MJ	177	168
Landnutzung ²⁾	Pt	330	214
Ressourcenverbrauch, Minerale und Metalle	kg Sb-Äquivalente	3,24E-05	2,74E-05
Ozonabbau	kg CFC-11 Äquivalente	1,59E-07	1,36E-07
Versauerung	mol H ⁺ -Äquivalente	8,77E-02	6,15E-02
Ionisierende Strahlung	kBq U235-Äquivalente	3,34	3,26
Fotochemische Oxidantienbildung	kg NMVOC-Äquivalente	2,87E-02	2,53E-02
Eutrophierung, Böden	mol N-Äquivalente	0,32	0,22
Eutrophierung, Meeresgewässer	kg P-Äquivalente	7,20E-02	4,72E-02
Eutrophierung, Binnengewässer	kg N-Äquivalente	1,04E-02	9,31E-03

Die Ergebnisse in Tabelle 5.3 zeigen, dass das Szenario *ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern)* in allen Wirkungskategorien besser abschneidet als das Szenario *Klassischer Prozess* und damit das Frottierhandtuch mit einem 30 %igen Anteil PCR-Fasern ökologisch vorteilhafter ist. Der nachfolgend dargestellte Ökologe-Index unterstreicht dieses Gesamtergebnis.

5.3 Ökologie-Index

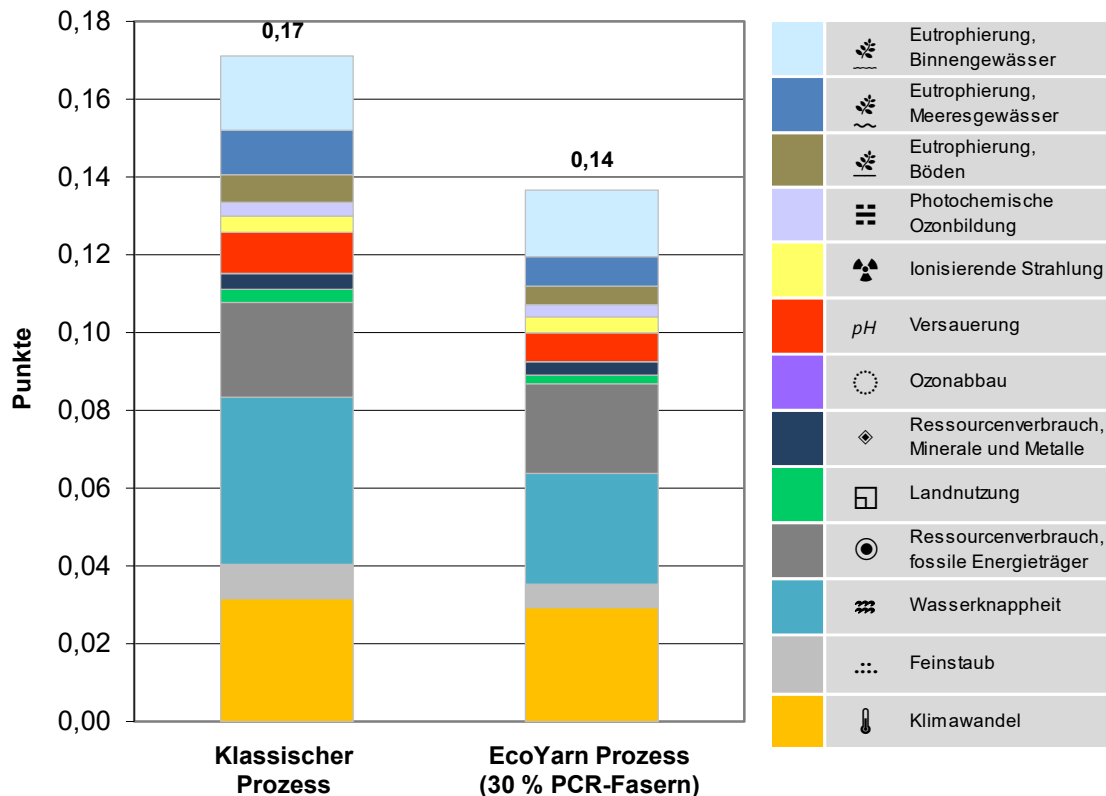


Abbildung 5.2: Ökologie-Index - Vergleich der Szenarien bezogen auf die Herstellung eines Frottierhandtuchs

Abbildung 5.2 zeigt, dass das Szenario *ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern)* den niedrigeren Ökologie-Index aufweist und damit über alle Wirkungskategorien besser abschneidet. Aus Sicht der umweltbezogenen Bewertung ist das Frottierhandtuch mit einem 30 %igen Anteil PCR-Fasern damit ökologisch vorteilhafter als das Frottierhandtuch ausschließlich hergestellt aus Baumwollfasern. Die Reduzierung des Ökologie-Index ist auf die vermiedene Herstellung von Baumwollfasern inklusive dem Transport aus Spanien nach Deutschland aufgrund der teilweisen Substitution durch PCR-Fasern sowie dem damit verbundenen geringeren Strombedarf bei der Spinnereivorbereitung und Spinnerei zurückzuführen.

Darüber hinaus zeigt Abbildung 5.2, dass die Ökologie-Indices hauptsächlich durch die Wirkungskategorien Wasserknappheit, Klimawandel, Ressourcenverbrauch an fossilen Energieträgern und Eutrophierung von Binnengewässern bestimmt werden. Der Anteil dieser Wirkungskategorie an den Ökologie-Indices beträgt 69 % im Szenario *ECO YARN Prozess (30 % PCR-Fasern)* und 72 % im Szenario *Klassischer Prozess*.

Literatur

- [Andreas Bassi 2023] Andreas Bassi S., Biganzoli F., Ferrara N., Amadei A., Valente A., Sala S., Ardente F. (2023): Updated characterisation and normalisation factors for the Environmental Footprint 3.1 method. Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/798894, JRC130796, 2023
- [DIN 2021a] Deutsches Institut für Normung DIN e.V.: DIN EN ISO 14040:2021-02 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020). English: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, Beuth Verlag, Berlin, 2021
- [DIN 2021b] Deutsches Institut für Normung DIN e.V.: DIN EN ISO 14044:2021-02 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020). English: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, Beuth Verlag, Berlin, 2021
- [ecoinvent 2024] Life cycle inventory database ecoinvent v3.10. <https://www.ecoinvent.org>, Zürich, 2024
- [EU 2021] Europäische Union: Empfehlung (EU) 2021/2279 der Kommission vom 15. Dezember 2021 zur Anwendung der Methoden für die Berechnung des Umweltfußabdrucks zur Messung und Offenlegung der Umweltleistung von Produkten und Organisationen entlang ihres Lebenswegs
- [JRC 2011] European Commission's Joint Research Centre (JRC) – Institute for Environment and Sustainability (2011): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook – Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context. First edition November 2011, Luxemburg 2011
- [JRC 2018] European Commission's Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: JRC Technical Reports - Development of a weighting approach for the Environmental Footprint. 2018
- [JRC 2023] European Commission's Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: JRC Technical Report - Updated characterisation and normalisation factors for the Environmental Footprint 3.1 method. doi:10.2760/798894, 2023
- [Offermann 2017] Offermann, M.; von Manteuffel, B.; Stoffregen, A.; Hengstler, J.; Reuter, J.; Schuller, O.; Koffler, C.: Ökoeffizienzanalyse von Heiz- und Speichersystemen für private Haushalte. Ecofys Germany GmbH and thinkstep AG on behalf of Bavarian Ministry of Economic Affairs, Energy and Technology
- [Otto 2024] Informationen vom Projektpartner Gebr. Otto Baumwollfeinzwirner GmbH + Co.KG
- [Sala 2018] Sala S., Cerutti A.K., Pant R.: Development of a weighting approach for the Environmental Footprint, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79- 68042-7, EUR 28562, doi:10.2760/945290, 2018
- [Schuster 2011] Schuster, G.: Spinnverfahren für recycelte Baumwolle, RECOT². Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 27606 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Balzheim, 2011
- [Schwob 2025] Informationen vom Projektpartner Schwob AG
- [THA 2026] Informationen vom Projektpartner Technische Hochschule Augsburg – Recycling Atelier
- [Weseta 2025] Informationen vom Projektpartner Weseta Textil AG

Anhang A: Zusammenführung ökologischer Einzelergebnisse zum Ökologie-Index

Für einen ökologischen Gesamtvergleich ist es hilfreich, die Wirkungsindikatorergebnisse in ihrer Bedeutung vor dem Hintergrund einer definierten Belastungssituation einzuordnen. Dazu werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung in drei Stufen nach der Environmental Footprint Methodology der EU [Sala 2018a, Andreasi Bassi 2023] zu einem Ökologie-Index zusammengefasst:

1. Normierung der Wirkungsindikatorergebnisse zu Einwohnerwerten
2. Gewichtung der Wirkungskategorien
3. Zusammenführung der normierten und gewichteten Ergebnisse zum Ökologie-Index

Normierung

In der DIN EN ISO 14044 wird die Normierung als ein optionaler Bestandteil der Wirkungsabschätzung beschrieben.

Ausgangspunkt für die Aggregation der einzelnen Wirkungsindikator-/Sachbilanzergebnisse eines Szenarios sind die Einwohner(durchschnitts)werte (EW), die sich aus den jeweiligen Wirkungsindikator-/Sachbilanzergebnissen und den entsprechenden Gesamtemissionen errechnen. Das Ergebnis stellt den spezifischen Beitrag der jeweiligen Wirkungskategorie dar. Positive Einwohnerwerte repräsentieren eine Umweltbelastung, während negative Einwohnerwerte Umweltentlastungen bedeuten.

Die auf diesem Wege für jede Wirkungskategorie berechneten so genannten Einwohnerwerte erlauben einen größenordnungsbezogenen Vergleich der verschiedenen Wirkungsindikatorergebnisse. Ein Einwohnerwert entspricht dabei dem durchschnittlichen Pro-Kopf-Beitrag einer Person zur jeweiligen Wirkungskategorie. Je größer die Anzahl der Einwohnerwerte ist, desto bedeutender ist diese Wirkungskategorie für die ökologieorientierte Beurteilung.

Berechnet werden die Einwohnerwerte über folgenden Ansatz:

$$\text{Einwohnerwert (EW)} = \frac{\text{Ergebnis der Wirkungskategorie}}{\text{Referenzwert}} \times \text{Einwohner Europa}$$

Die für die Normierung der Ergebnisse dieser Studie verwendeten Referenzwerte sind in Tabelle A1 dargestellt.

Tabelle A1: Grundlage für die Normung: Referenzwerte (Normalisierungsfaktoren) in EF3.1 [JRC 2023]

Wirkungskategorie	Indikator (Einheit)	Referenzwert (Normalisierungsfaktor)
Klimawandel	kg CO ₂ -Äquivalente	7.55E+03
Feinstaubbelastung mit anorganischen Emissionen	Disease Incidence	5.95E-04
Wasserknappheit	m ³ Wasser-Äquivalente	1.15E+04
Ressourcenverbrauch, fossile Energieträger	MJ	6.50E+04
Landnutzung ²⁾	Pt ³⁾	8.19E+05

Ressourcenverbrauch, Minerale und Metalle	kg Sb-Äquivalente	6.36E-02
Ozonabbau	kg CFC-11 Äquivalente	5.23E-02
Versauerung	mol H ⁺ -Äquivalente	5.56E+01
Ionisierende Strahlung	kBq U235-Äquivalente	4.22E+03
Fotochemische Oxidantienbildung	kg NMVOC-Äquivalente	4.09E+01
Eutrophierung, Böden	mol N-Äquivalente	1.77E+02
Eutrophierung, Meeresgewässer	kg P-Äquivalente	1.95E+01
Eutrophierung, Binnengewässer	kg N-Äquivalente	1.61E+00

Gewichtung

Die Gewichtung ist in der DIN EN ISO 14044 ebenfalls ein optionaler Bestandteil der Wirkungsabschätzung.

Um einen einzelnen ökologischen Indikator (sog. Single Score) zu erhalten, wird eine kategorienübergreifende Gewichtung durchgeführt. Die standardisierten Indikatorwerte der Wirkungskategorien werden dafür untereinander mit einem Gewichtungsschlüssel gewichtet.

Durch den Gewichtungsschlüssel können einzelne Wirkungskategorien das Gesamtergebnis der ökologischen Analyse entsprechend mehr oder weniger beeinflussen. Zudem können Umweltkategorien mit mehreren Wirkungskategorien, wie z.B. die Eutrophierung, zu einem Einzelwert zusammengefasst werden [Offermann 2017].

Der für die Gewichtung in dieser Studie verwendeten Gewichtungsschlüssel ist in Tabelle A2 dargestellt.

Tabelle A2: *Grundlagd der Gewichtung: Empfohlene Gewichtungsfaktoren für die normierten Wirkungskategorien in EF3.1 [JRC 2018]*

Wirkungskategorie	Indikator (Einheit)	Gewichtung
Klimawandel	kg CO ₂ -Äquivalente	22,19 %
Feinstaubbelastung mit anorganischen Emissionen	Disease Incidence	6,75 %
Wasserknappheit	m ³ Wasser-Äquivalente	9,54 %
Ressourcenverbrauch, fossile Energieträger	MJ	5,37 %
Landnutzung ²⁾	Pt ³⁾	5,10 %
Ressourcenverbrauch, Minerale und Metalle	kg Sb-Äquivalente	6,64 %
Ozonabbau	kg CFC-11 Äquivalente	3,91 %
Versauerung	mol H ⁺ -Äquivalente	2,95 %
Ionisierende Strahlung	kBq U235-Äquivalente	3,12 %
Fotochemische Oxidantienbildung	kg NMVOC-Äquivalente	8,42 %
Eutrophierung, Böden	mol N-Äquivalente	9,03 %
Eutrophierung, Meeresgewässer	kg P-Äquivalente	8,08 %
Eutrophierung, Binnengewässer	kg N-Äquivalente	8,92 %

Zusammenführung

Die Berechnung der Ökologie-Indices erfolgt separat für jede Wirkungskategorie und jedes untersuchte Szenario über folgenden Ansatz:

$$\text{Ökologie – Index} = \sum \text{Einwohnerwert} \times \text{Gewichtung}$$

Durch die Aufsummierung der einzelnen normierten und gewichteten ökologischen szenario-spezifischen Indikatorwerte wird eine Relation zwischen den verschiedenen Wirkungskategorien im Szenario hergestellt. Die Summe aller Indikatorwerte eines Szenarios ist der dimensionslose „Single Score“ Ökologie-Index.

Anhang B: Datenlücken, Annahmen, Abschneidekriterien und Verrechnung von Gutschriften

Datenlücken und Annahmen

Bei der Begrenzung der Komplexität der Modelle muss darauf geachtet werden, dass die Vergleichbarkeit der Szenarien erhalten bleibt. Dazu wurden die in diesem Abschnitt beschriebenen Kriterien für eine einheitliche Bestimmung der Systemgrenzen festgelegt.

Die Vorgabe der DIN EN ISO 14040, dass der Stoff- und Energieeinsatz (Inputseite) sowie die Emissionen und Produkte (Outputseite) an ihren Systemgrenzen Elementarflüsse sein sollen, wurde bei der Modellierung soweit als möglich berücksichtigt. Für alle Input-Stoffe und Energieträger, die außerhalb der nachfolgend beschriebenen Detailgrenzen liegen, wurden Vorketten beginnend bei der Gewinnung aus natürlichen Lagerstätten bis hin zur Bereitstellung für den jeweiligen Prozess modelliert. Waren keine belastbaren Daten verfügbar, sind vergleichbare Prozesse herangezogen und Annahmen getroffen worden.

Abschneidekriterien vorgelagerter Prozesse (Vorketten)

Die Detailgrenze für die Vernachlässigung der Modellierung der Vorketten von Input-Materialien wurde mit 1 Gew.-% eines Referenzflusses (meist gewünschter Output) festgelegt. Die Summe aller vernachlässigten Inputmaterialien eines Prozesses sollte jedoch nicht größer als jeweils 3 Gew.-% des Referenzflusses sein. Ausgenommen davon waren Materialien mit geringem Massenanteil, wenn in deren Vorkette Prozesse enthalten sind, die hinsichtlich toxischer oder energetischer Aspekte für die gesamte ökobilanzielle Betrachtung bedeutsam sein konnten.

Die Bereitstellung ubiquitärer Ressourcen, z. B. Luft, wurde nicht berücksichtigt.

Abschneidekriterien nachgelagerter Prozesse (Nachketten)

Für Produktionsabfällen und Reststoffen zur Beseitigung wie auch zur Verwertung galten die gleichen Abschneidekriterien wie für die vorgelagerten Prozesse, d. h. die Behandlung wurde dann modelliert, wenn die Abschneidekriterien nicht ausreichten und wenn die Beschreibung verwendeter Module oder Datensätze aus Bibliotheken oder Datenbanken nicht schon auf eine Berücksichtigung hinwies.

Verrechnung von Gutschriften in Äquivalenzsystemen zu Systemnutzen

Aus der Entsorgung von Frottierhandtüchern im Anschluss an die Nutzungsphase sowie durch die Entsorgung von Produktionsabfällen, die im Rahmen der untersuchten Prozesse anfallen, kann ein zusätzlicher Nutzen resultieren. Dazu zählen u.a. Sekundärrohstoffe aus dem werkstofflichen Recycling oder Strom und Wärme aus der thermischen/energetischen Abfallverwertung. Als Folge müssen die entsprechenden Produkte bzw. Energiemengen nicht auf konventionellem Weg aus Primärrohstoffen hergestellt werden (eine gleich bleibende Nachfrage wird dabei unterstellt). Die Umweltauswirkungen, die mit der konventionellen Herstellung jedes einzelnen Zusatznutzens verbunden sind, werden somit „eingespart“ bzw. „vermieden“. Um den Vergleich der Szenarien zu vervollständigen, werden diese „vermiedenen“ Umweltauswirkungen bilanziert und den Umweltauswirkungen der Frottierhandtüchern gut geschrieben.

Der konventionelle Herstellungs- bzw. Produktionsprozess eines Zusatznutzens wird als Äquivalenzprozess oder Äquivalenzsystem bezeichnet. Für jeden quantifizierbaren Zusatznutzen wurde ein spezifisches Äquivalenzsystem erstellt, das den gleichen bzw. einen vergleichbaren funktionsäquivalenten Nutzen erzeugt. Dabei ersetzen die Zusatznutzen der Entsorgungssysteme aufgrund geringerer Qualität oder prozessbedingt nicht immer zu 100 % die

Primärrohstoffe. Dieses Verhältnis wird durch einen so genannten Substitutionsfaktor beschrieben, der fall- bzw. stoffspezifisch angegeben wird.

In den beiden untersuchten Prozessen wurden Zusatznutzen aus der Strom- und Wärmebereitstellung sowie der Verwertung von kurzen Baumwollfasern, die als Produktionsabfall anfallen, in der Geldscheinpapierherstellung generiert. Die Tabelle A3 zeigt die Äquivalenzsysteme und jeweiligen Substitutionsfaktoren

Tabelle A3: Zusatznutzen, Äquivalenzsystem und Substitutionsfaktor bei den untersuchten Verfahren

Zusatznutzen	Äquivalenzsystem	Substitutionsfaktor
Strom aus der Verbrennung (thermische Abfallbehandlung)	Elektrische Energie aus dem Strommix Deutschland	1,0
Wärme aus der Verbrennung (thermische Abfallbehandlung)	Dampf/Wärme aus einem repräsentativem Gasheizkraftwerk	1,0
Einsatz von kurzen Baumwollfasern in der Geldscheinpapierherstellung	Primäre Baumwollfasern	1,0

Anhang C: Erläuterungen zur Darstellung der Ergebnisse

Klimawandel

Für die Auswertung der Wirkungskategorie Klimawandel werden Darstellungen verwendet, wie in Abbildung A1 erläutert.

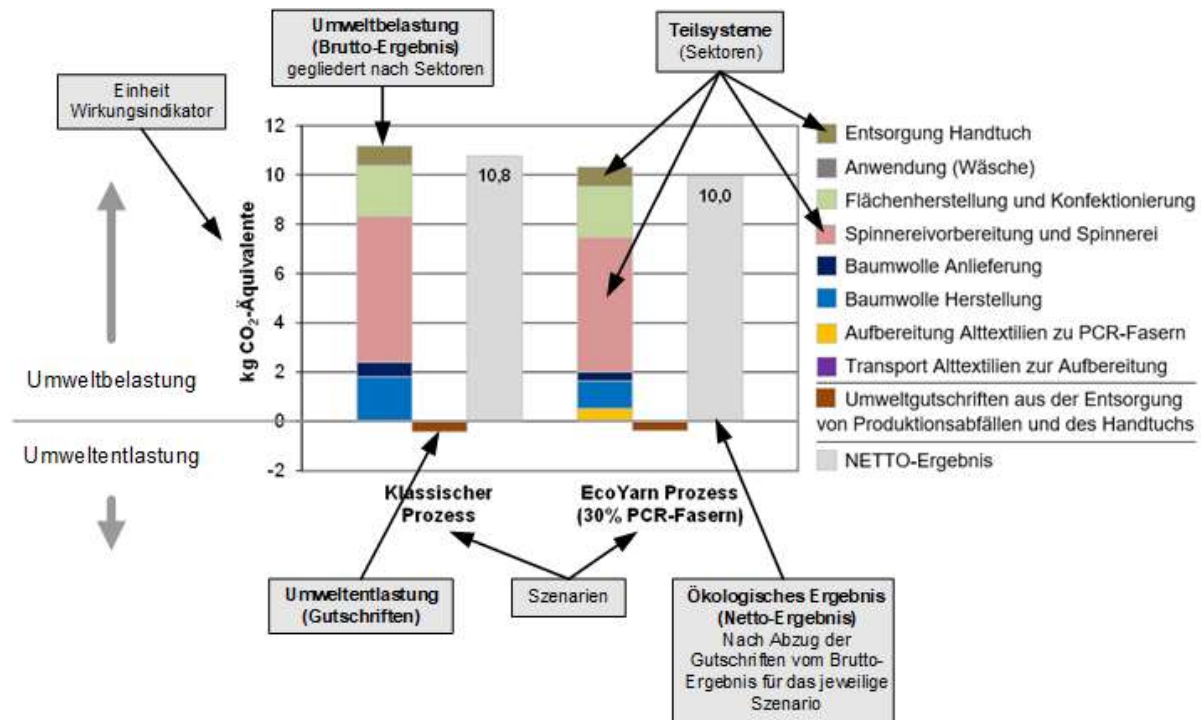


Abbildung A1: Erläuterung der graphischen Darstellung zur Bewertung der Beiträge der untersuchten Szenarien zur Wirkungskategorie Klimawandel

Die ökobilanzielle Betrachtung liefert drei Ergebnissätze. Die jeweils linken Balken der Abbildung A1 zeigen zum einen die Brutto-Aufwandsergebnisse (Umweltbelastungen – Balken nach oben) und zum anderen die Umwelt-Gutschriften (Umweltentlastungen – Balken nach unten). Die sektorale Darstellung Brutto-Aufwandsergebnisse in farblich unterteilten Abschnitten erlaubt es, die Teilsysteme (Sektoren) mit relevanten Beiträgen zum Gesamtergebnis zu identifizieren.

Aus der Verrechnung der Umweltbelastungen und -entlastungen resultiert das Netto-Ergebnis für das betrachtete Szenario, das in Abbildung A1 jeweils im rechten (grauen) Balken dargestellt ist. Es zeigt an, ob die Umwelt durch den Beitrag des Szenarios insgesamt belastet (Balken nach oben) oder entlastet (Balken nach unten) wird. Auf eine farblich unterteilte Darstellung des Netto-Ergebnisses wird verzichtet, da aufgrund der Verrechnung eine Auflösung in Sektoren nicht möglich ist.

Ökologie-Index

Für die Auswertung der dimensionslosen Ökologie-Indices werden Darstellungen verwendet, wie in Abbildung A2 erläutert.

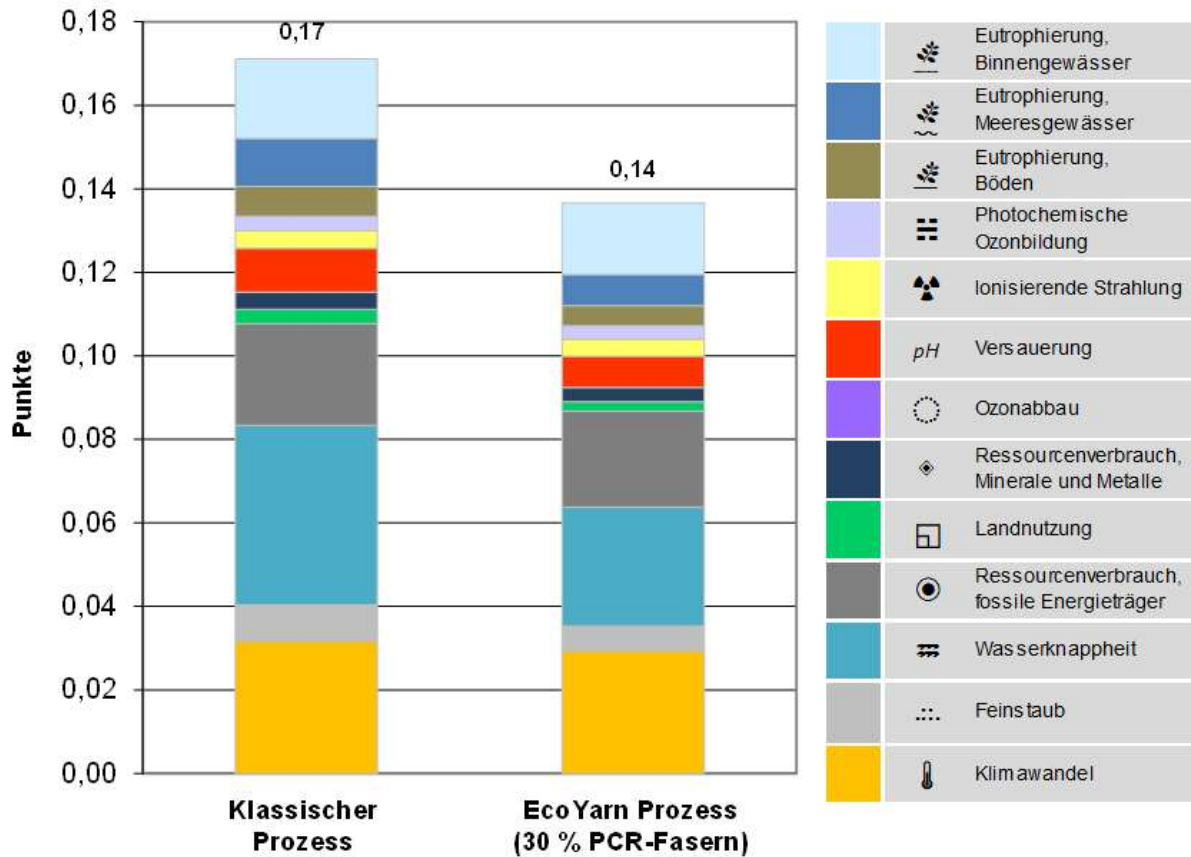


Abbildung A2: Erläuterung der graphischen Darstellung zur Bewertung der Ökologie-Indices der untersuchten Szenarien

Die Höhe der Balken in den Abbildungen entspricht dem Ökologie-Index der Szenarien, der auch als Zahlenwert angegeben ist. Die sektorale Darstellung in farblich unterteilten Abschnitten erlaubt es, die Umweltwirkungen (Wirkungskategorien) mit den höchsten Beiträgen zum Ökologie-Index zu identifizieren.