

Textilrecycling – Status Quo und aktuelle Entwicklungen

Kurzstudie im Auftrag des NABU - Naturschutzbund
Deutschland e.V.

Freiburg, 17.09.2024

Autorinnen

Clara Löw
Hannah Lorösch
Katja Moch

Öko-Institut e.V.

Kontakt

info@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Executive Summary	4
1 Einführung	5
2 In Verkehr gebrachte Textilien	6
3 Status Quo der Verwertungswege und -technologien	7
3.1 Sammlung und Sortierung von Alttextilien	7
3.2 Recycling von Alttextilien	12
3.2.1 Kurze Einführung in Klassifizierung der Recyclingtechnologien	14
3.2.2 Überblick über Technologien	15
3.2.3 Beispiele	24
4 Herausforderungen und Lösungsansätze	26
5 Bewertung	28
6 Gesetzliche Rahmenbedingungen	30
7 Fazit	35
Literaturverzeichnis	38
Anhänge	42
Anhang I. Abkürzungsverzeichnis	42
Anhang II. Tabellen- und Abbildungsverzeichnis	43
Anhang III. Schematische Darstellungen von Recyclingtechnologien	44

Zusammenfassung

Für das Jahr 2018 wurde die Sammelmenge an Alttextilien in Deutschland auf ca. 1 Mio. t geschätzt, was einer geschätzten Sammelquote von 64 % entspricht (Wagner et al. 2022). Rund 62 % der Sammelmenge wird für die Wiederverwendung vorbereitet, insgesamt 26 % werden stofflich verwertet. Der größte Teil der wiederverwendbaren Alttextilien (mindestens 50 %) wird in andere EU- und Nicht-EU-Länder exportiert. Für den weiteren Verbleib dort gibt es keine verlässlichen Zahlen; schätzungsweise wird ein nicht unerheblicher Teil weiter thermisch verwertet oder deponiert (European Environment Agency 2023).

Bezüglich der stofflichen Verwertung ist festzuhalten, dass der größte Absatzmarkt des Outputs der heute gängigen Recyclingverfahren außerhalb der Bekleidungs- und Textilindustrie liegt (Open-Loop-Recycling). Von dem Anteil, der für das Recycling zur Verfügung steht, werden in der EU aktuell nur ca. 16 % als spinnbare Fasern für eine textile Verwendung zurückgewonnen – das entspricht einem Anteil von ca. 5% der Alttextilmenge, die für das Recycling in der EU zur Verfügung steht (Huygens et al. 2023). Global wird nur 1 % der Alttextilien mittels Faser-zu-Faser-Recycling (F2F-Recycling) recycelt. Von allen recycelten Fasern, die im Bekleidungssektor eingesetzt werden, stammt der größte Anteil mit ca. 93 % aus recycelten PET-Getränkeflaschen, die hauptsächlich mechanisch recycelt werden (Textile Exchange 2022).

Mit einem Anteil von 65-87 % ist das mechanische Recycling das aktuell dominierende Recyclingverfahren, welches im Vergleich zur Depolymerisierung und zum rohstofflichen Recycling (Pyrolyse und Gasification) geringere Umweltauswirkungen hat, allerdings auch zu einer Qualitätsabnahme durch eine Abnahme der Faserlänge führt. Das sogenannte chemische Recycling von Alttextilien befindet sich in der Entwicklungs- bzw. Skalierungsphase. Es gibt insbesondere viele Projekte und Start-ups, welche sich mit der Depolymerisierung von Faserbestandteilen aus Alttextilien beschäftigen.

In diesem Bericht wird ein ausführlicher Überblick über die aktuell bekannten Technologien zum F2F-Recycling von Textilien sowie ihre Stärken und Schwächen gegeben. Dabei werden mechanisches Recycling, lösemittel-basierte Aufbereitung, Depolymerisierung und rohstoffliches Recycling unterschieden. Prinzipiell sind die verschiedenen Recyclingtechnologien nicht als konkurrierende Verfahren zu verstehen: Für verschiedene Arten von Alttextilien sollten verschiedene Verfahren angewendet werden, wobei das mechanische Recycling gegenüber der Depolymerisierung zu priorisieren ist. Das rohstoffliche Recycling kann – unter Anwendung bestimmter Regeln – ergänzend als letzte Alternative genutzt werden. Da das mechanische Recycling Grenzen hat und das rohstoffliche Recycling mit hohem Energieaufwand einen unspezifischen Kohlenwasserstoff-Mix ergibt, gilt die Depolymerisierung aktuell als vielversprechendste Option. Das Verfahren steckt allerdings noch in der Entwicklung.

Neben technischen Entwicklungen sind Anreize für eine Erhöhung des Rezyklatanteils in Textilien erforderlich, damit das vorhandene Potenzial des F2F-Recyclings ausgeschöpft werden kann und die Sortierunternehmen aus wirtschaftlicher Sicht weiter bestehen können. Aktuell sind einige gesetzlichen Initiativen in der Ausarbeitung und z.T. schon entschieden, die einen solchen Anreiz bieten können. Hier sind u. a. verbindliche Anforderungen für die Produktspekte Rezyklatanteil und Recyclingfähigkeit über die EU-Ökodesign-Verordnung, die Einführung der Getrenntsammelpflicht in der EU ab 2025 sowie die Einführung einer erweiterten Herstellerverantwortung für Textilien durch eine Revision der Abfallrahmenrichtlinie zu nennen. Die tatsächlichen Auswirkungen dieser gesetzlichen Änderungen hängen von deren konkreter Ausgestaltung ab, welche zu diesem Zeitpunkt noch unklar ist.

Executive Summary

For 2018, the volume of used textiles collected in Germany was estimated at around 1 million tonnes, which corresponds to an estimated collection rate of 64%. About 62% of the collected volume is prepared for reuse, while a total of 26% is recycled. The majority of reusable used textiles (at least 50%) are exported to other EU and non-EU countries. There are no reliable figures for the further fate there. It is estimated that a considerable share is thermally treated or landfilled.

With regard to material recycling, it should be noted that the largest sales market for the output of today's recycling processes is outside the clothing and textile industry (open-loop recycling). Of the share that is available for recycling, in the EU only approx. 5% is currently recovered as spinnable fibres for use in the clothing sector resulting in a rate of 1% fibre-to-fibre recycling globally. For recycled fibres in textile products, the largest proportion, around 93%, comes from recycled PET bottles, which are mainly mechanically recycled.

With a share of 65-87%, mechanical recycling is currently the dominant recycling process, which has a lower environmental impact compared to depolymerisation and feedstock recycling (pyrolysis and gasification), but also leads to a reduction in quality due to a decrease in fibre length. The so-called chemical recycling of used textiles is currently in the development and scaling-up phase. In particular, many projects and start-ups working on the depolymerisation of fibres from used textiles.

This report provides a detailed overview of the currently known technologies for fibre-to-fibre recycling of textiles as well as their strengths and weaknesses. A distinction is made between mechanical recycling, solvent-based purification, depolymerisation and feedstock recycling. In principle, the various recycling technologies should not be seen as competing processes: Different processes should be used for different types of used textiles, with mechanical recycling being prioritised over depolymerisation. As mechanical recycling has its limits and feedstock recycling produces an unspecific hydrocarbon mix with high energy input, depolymerisation is currently considered the most promising development. However, the process is still under development.

In addition to technical developments, incentives are needed to increase the share of recycled content in textiles so that the existing potential of fibre-to-fibre recycling can be exploited. A number of regulatory initiatives are currently being drafted or are agreed upon recently that could provide such an incentive. These include binding requirements for recycled content and recyclability via the EU Ecodesign Regulation, the introduction of mandatory separate collection in the EU from 2025 and the introduction of extended producer responsibility for textiles through a revision of the Waste Framework Directive. The actual impact of these legal changes depends on their specific form, which is still unclear at this point in time.

1 Einführung

Die Produktion, der Konsum und der Import von Bekleidung hat hohe Umweltauswirkungen und gehört zu den ressourcenintensivsten Gütern unserer Konsumgesellschaft: Gemäß dem Umweltbundesamt (Jungmichel et al. 2020) verursacht der Bekleidungssektor mehr als 1 % der globalen Treibhausgas-Emissionen¹, verbraucht 5 % der weltweit produzierten Chemikalien, macht 4 % der jährlich ausgebrachten Düngemenge aus und ist für 1 % der weltweiten Wasserentnahme aus Gewässern und dem Grundwasser verantwortlich. Darüber hinaus steht der Sektor wegen menschenrechtlichen Verstößen in der Lieferkette und unsachgemäßer Entsorgung von Alttextilien im Globalen Süden in der Kritik.

Die Kreislaufwirtschaft kann einen Beitrag leisten, Umweltauswirkungen zu reduzieren, allgemein und im Speziellen für Textilien. Gemäß Prakash et al. (2023a) sind zentrale Maßnahmen einer Circular Economy für Textilien:

1. die Steigerung der Nutzungsdauer bereits vorhandener Textilien,
2. die Veränderung konsumseitiger Nutzungsformen,
3. die Stärkung der Vorbereitung zur Wiederverwendung, inklusive der Reparatur, und
4. die Stärkung des Faser-zu-Faser-(F2F)-Textilrecyclings.

Dieser Bericht konzentriert sich auf das Faser-zu-Faser-(F2F)-Recycling, die vierte der genannten Maßnahmen für einen zirkulären Textilsektor. Das Ziel der Studie ist es, den Status Quo der stofflichen Verwertung von Alttextilien darzustellen und die Herausforderungen und Potenziale der verschiedenen derzeit praktizierten oder diskutierten Ansätze des hochwertigen Recyclings von Textilabfällen zu beschreiben.

Entscheidungsträger*innen in der nationalen und europäischen Politik erkennen die mit der Produktions- und Konsumweise und der Entsorgung verbundenen Umweltwirkungen und den Beitrag der Circular Economy an und haben in den letzten Jahren eine Reihe an regulatorischen und strategischen Initiativen gestartet, darunter die EU-Textilstrategie (Europäische Kommission 2022) und der Entwurf einer Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (BMUV 2024), die Textilien als ein Handlungsfeld behandelt. Daraus folgten und folgen einige Gesetzesvorhaben, Förderprogramme und weitere Aktivitäten. Details, die mit dem Fokus der Studie zusammenhängen, finden sich in diesem Bericht.

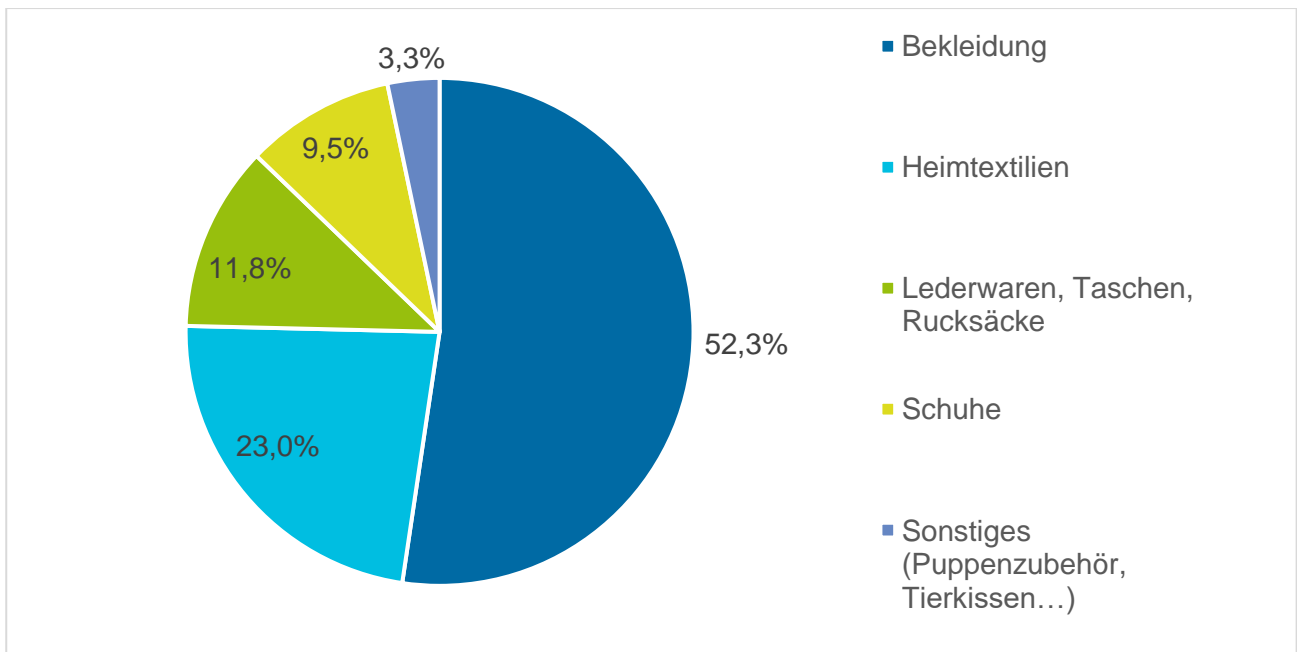
Die Haltbarkeit und Verlängerung der Nutzungsdauer von Textilien trägt wesentlich dazu bei, dass die oben genannten Maßnahmen 1 bis 3 umsetzbar sind. Denn: Prakash et al. (2023a) haben gezeigt, dass die verhaltensbasierten Maßnahmen im Vergleich zu den technischen eine größere Umweltentlastung erreichen können. Das heißt, die größte Entlastung der Umweltauswirkungen entsteht, wenn Textilien länger halten, wir sie länger tragen und so den Konsum von Textilien reduzieren.

¹ Über den Beitrag des Textilsektors an den globalen Treibhausgas-Emissionen gibt es eine große Debatte. Weitere Infos hier: <https://www.linkedin.com/pulse/what-co2-emissions-fashion-industry-lutz-walter-qyuxe> (zuletzt besucht am 18.06.2024)

2 In Verkehr gebrachte Textilien

Im Jahr 2021 wurden etwa 1,62 Millionen Tonnen Textilien in Deutschland auf den Markt gebracht (Bünemann et al. 2023). Anteilsmäßig am relevantesten ist hierbei mit etwas über der Hälfte der Bekleidungssektor. Aktuell liegt der Pro-Kopf-Verbrauch von Bekleidung bei ca. 18 kg im Jahr (bvse 2020).

Abbildung 2-1: Aufteilung der in Verkehr gebrachten Mengen nach Produktkategorie



Quelle: Eigene Darstellung, Daten aus Bünemann et al. (2023)

Hinweis: Die Daten zum Textilverbrauch stammen von der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung. Die Produktgruppe technische Textilien wurde nicht separat erfasst.

Unter textilen Produkten sind alle Produkte zusammengefasst, die aus mindestens 80 % textilen Fasern bestehen. Hierzu gehören Bekleidung, Heimtextilien (Vorhänge, Bettwäsche etc.), Schuhe sowie technische Textilien (Huygens et al. 2023). Unter technischen Textilien versteht man textile Produkte, bei denen der funktionelle Aspekt im Vordergrund steht. Hier gibt es vielfältige Anwendungsbereiche wie beispielsweise in der Medizin (Wundverbände, persönliche Schutzausrüstungen), der Automobilindustrie (Sicherheitsgurte, Innenausstattung, Airbags), der Reinigungsindustrie, im Arbeitsschutz oder als Teil von Drainagen oder Sonnenschutz-Textilien (Bünemann et al. 2023). Der größte Anteil der auf den Markt gebrachten Textilien wird dabei importiert. Betrachtet man den europäischen Markt, so werden nur 33 % der Textilien innerhalb der EU produziert, der Fokus liegt hierbei vor allem auf technischen Textilien. Europaweit wird von einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate des Textilsektors bzw. des Konsums von textilen Produkten von 3 % ausgegangen.

Die mit Abstand dominierende Faser am globalen Fasermarkt ist Polyester mit 54 %, gefolgt von Baumwolle mit 22 % (Textile Exchange 2022). Betrachtet man nur Bekleidung, ist Baumwolle die am häufigsten verwendete Faser gefolgt von Polyester. Die Faserzusammensetzung variiert dabei stark je nach Produktgruppe. Produkte mit einem hohen Baumwollanteil zwischen 45-70 % sind beispielsweise T-Shirts, Blusen, Hosen und Kleider (van Duijn et al. 2022). Heimtextilien wie Vorhänge,

Decken oder Teppiche sowie technische Textilien haben dahingegen einen höheren Polyesteranteil (Huygens et al. 2023).

Auf dem globalen Fasermarkt lag 2021 der Anteil an rezyklierten Fasern bei 8,5 %. Den größten Anteil hiervon hatten rezyklierte Polyestergarne aus PET-Getränkeflaschen mit insgesamt 7,9 % der globalen Faserproduktion. PET-Getränkeflaschen sind ein beliebter Inputstrom für das Recycling, da es ein reiner Abfallstrom ist, der für das mechanische Recycling genutzt werden kann. Momentan stammt der größte Anteil (schätzungsweise 99 %) der rezyklierten Polyesterfasern aus mechanisch recycelten PET-Getränkeflaschen, während die Depolymerisierung von Polyester sich noch in der Entwicklungs- bzw. Skalierungsphase befindet. Demnach wird ein Anstieg des Marktanteils von rezyklierten Polyesterfasern aus Depolymerisierung in den kommenden Jahren erwartet. Die Verwendung von PET-Getränkeflaschen für Textilien stellt allerdings ein Down-Cycling dar, denn diese Flaschen werden dem Recyclingkreislauf für neue PET-Getränkeflaschen entzogen. Zudem trägt der Einsatz von Rezyklat aus PET-Getränkeflaschen nicht zur Lösung des Problems bei, dass weltweit der größte Teil der Alttextilien verbrannt oder deponiert wird (Textile Exchange 2022).

3 Status Quo der Verwertungswege und -technologien

3.1 Sammlung und Sortierung von Alttextilien

Vorab ist festzuhalten, dass es keine verlässliche Datenlage zur Sammlung von Alttextilien gibt, da die am Markt tätigen Akteure z. B. im Gegensatz zum Verpackungs- oder Elektro-/Elektroniksektor, aktuell keine Registrierungs- bzw. Berichtspflichten in Bezug auf in Verkehr gebrachte, gesammelte und verwertete Mengen haben. Die nachfolgend genannten Zahlen basieren auf Schätzungen und Hochrechnungen.²

Für das Jahr 2018 wird die Sammelmenge in Deutschland auf ca. 1 Mio. t geschätzt, was bei einer geschätzten potenziell zur Verfügung stehenden Sammelmenge von 1,56 Mio. t einer Sammelquote von 64 % entspricht (Wagner et al. 2022). Von den verbleibenden 36 %, die nicht separat gesammelt werden, werden schätzungsweise 67 % mit dem Restmüll entsorgt. Der restliche Anteil setzt sich zum einen aus den Kleidungsstücken zusammen, die als ungenutzte Kleidungsstücke in den Kleiderschränken aufbewahrt werden und zum anderen aus den Textilien, die privat als Second-Hand-Ware verschenkt oder verkauft werden. Für diese Berechnungen wird die Alttextilmenge im Restmüll mit 4,5 kg pro Einwohner angenommen. Eine Studie der Europäischen Umweltagentur geht dagegen von einer Alttextilmenge von 6,8 kg im Restmüll in Deutschland aus (Deckers et al. 2024). Würde man diesen Wert für die Berechnung der Sammelquote zu Grunde legen, käme man nur noch auf eine Sammelquote von rund 50 %. Dies verdeutlicht die Unsicherheit in den genannten Daten,

² bvse (2020) ermittelte die potentielle Sammelmenge anhand von 3 Methoden: Einer Grundmethode (Inlandsverfügbarkeit durch Inlandsproduktion + Außenhandelsaldo. Annahme Tragedauer 1 Jahr, also Inlandsverfügbarkeit = potenzielle Sammelmenge), einer Verbrauchsmethode, bei der der Pro-Kopf-Verbrauch an Textilien (aus Schätzungen des Modekonsums) mit der Einwohnerzahl multipliziert wird und einer Konsummethode, die die im Ausland gekauften und nach Deutschland eingeführten Textilien berücksichtigt. Wagner et al. (2022) haben die Methode von bvse angepasst, indem sie z. B. eine andere Tragedauer (durchschnittlich 3 Jahre) angenommen haben. Für die Berechnung der tatsächlichen Sammelmenge wird folgendes von der potenziellen Sammelmenge abgezogen: Der Anteil an Textilien im Restmüll, eine Reserve, d.h. Kleidungsstücke, die ungenutzt in den Haushalten verbleiben, und ein Gewichtsverlust während der Gebrauchsphase durch Faserabrieb. Die Sammelquote ist dann die tatsächliche Sammelmenge geteilt durch die potenzielle Sammelmenge.

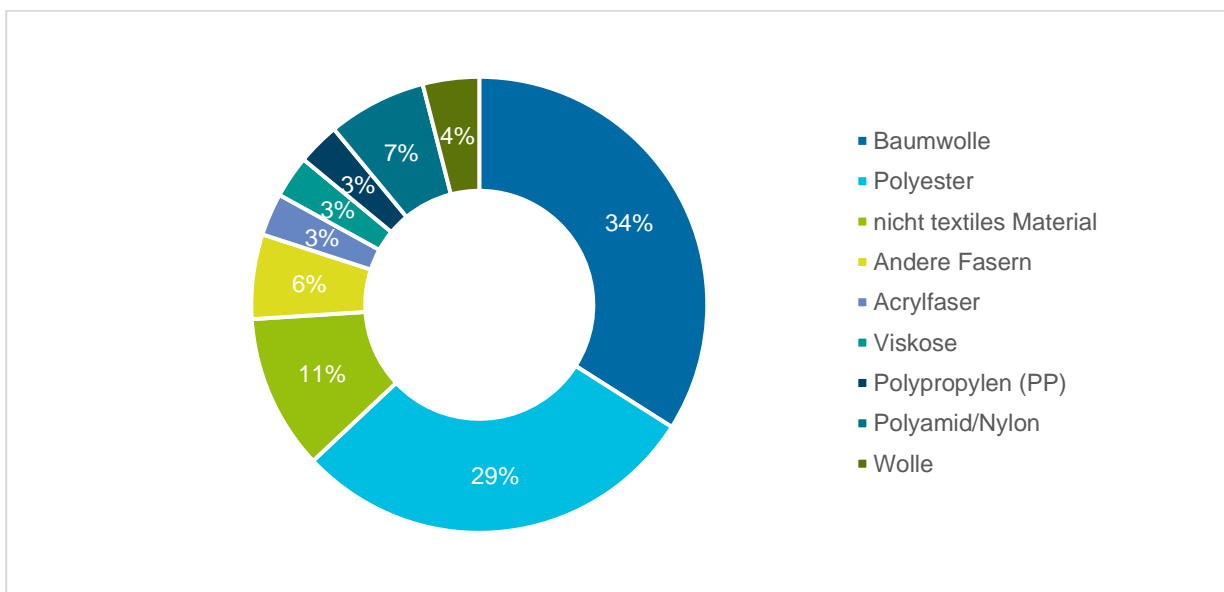
welche bei der Interpretation berücksichtigt werden sollte. Europaweit liegt die durchschnittliche Sammelquote bei etwa 38 % (Huygens et al. 2023; European Environment Agency 2024).

Die Alttextilsammlung- und Sortierung wird mit rund 73 % der Sammelmenge von privaten Akteuren dominiert, nur 37 % werden über öffentlich-rechtliche Entsorger (örE) gesammelt. Das gängigste Sammelsystem ist mit rund 96 % die Depot-Containersammlung, welche sowohl von gewerblichen als auch von gemeinnützigen Sammlern beziehungsweise von kommunalen Recyclinghöfen betrieben wird (Wagner et al. 2022).

Zusammensetzung der Alttextilien

Nicht alle auf den Markt gebrachten Textilien landen gleichermaßen in der Altkleidersammlung. Den größten Anteil an den Alttextilien macht mit rund 75 % die Bekleidung aus, während sie nur rund 50% der auf den Markt gebrachten Textilien ausmacht (Wagner et al. 2022). Dieser Unterschied liegt darin begründet, dass manche Produktkategorien wie Heimtextilien oder Taschen und Rucksäcke länger genutzt werden bzw. vermehrt privat als Second-Hand-Ware weitergegeben werden. Bedingt durch diese Differenz im Konsum und der Entledigung findet sich ein relativ hoher Baumwollanteil in der Faserzusammensetzung der Sammelware (siehe Abbildung 3-1). Der Großteil der Sammelware besteht aus Fasermischungen mit zwei oder mehr Fasertypen. Neben Baumwoll-Polyester Mischungen ist eine Beimischung von Elastan in Baumwollbekleidung eine häufige Fasermischung (van Duijn et al. 2022). Die Zugabe von Polyester oder Elastan wird neben Trageaspekten, wie beispielsweise der Dehnbarkeit von Elastanfasern, zur Aufwertung von kurzstapeligen Baumwollfasern genutzt (Gimkiewicz 2022). Nur etwa 20 % der Alttextilien haben eine homogene Faserzusammensetzung, zumeist aus reiner Baumwolle und ohne Störstoffe (z. B. Reißverschlüsse, Knöpfe oder Beschichtungen) oder mit solchen Störstoffen, die in üblichen Verfahren entfernt werden können (z. B. magnetisch). Dies ist insbesondere für die spätere Recyclingfähigkeit relevant, da die meisten Recyclingverfahren auf einen möglichst reinen Inputstrom angewiesen sind (mehr dazu in Abschnitt 3.2.2) (van Duijn et al. 2022).

Abbildung 3-1: Faserzusammensetzung von getrennt gesammelten Alttextilien in der EU



Quelle: Eigene Darstellung, Daten aus Huygens et al. (2023)

Verwertung der Alttextilien

Mindestens 50 % der Sammelmenge werden aus Deutschland exportiert und hauptsächlich in Europa vorsortiert (Wagner et al. 2022). Deutschland ist nach den USA der zweitgrößte Exporteur von Alttextilien (Destatis 22.03.2023). Die größten Importeure dieser Alttextilien sind Polen und die Niederlande, welche vermutlich den größten Teil weiter in Richtung Afrika oder Asien exportieren. In Polen wird außerdem ein nicht zu vernachlässigender Anteil der Alttextilien deponiert. Dies verdeutlicht die Relevanz, den Verbleib von exportierten getrennt gesammelten Alttextilien kritisch zu hinterfragen³ (European Environment Agency 2024).

Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn man die gesamte EU betrachtet. Auch hier besagen die Schätzungen, dass rund 50 % der Alttextilien grob vorsortiert und dann größtenteils nach Asien und Afrika exportiert werden. In Asien werden die Alttextilien zumeist weiter sortiert und lokal recycelt (größtenteils zu Putzlappen und Füllmaterial) oder weiter in meistens afrikanische Staaten exportiert. Die nach Afrika exportierten Alttextilien sind hauptsächlich für die Wiederverwendung bestimmt, wobei davon auszugehen ist, dass ein erheblicher Anteil davon nicht wiederverwendbar ist und auf Grund fehlender stofflicher Verwertungswege deponiert wird. Außerdem fallen in den importierenden Ländern diejenigen Textilabfälle an, die nach der Wiederverwendung entstehen. Nur rund 10 % der gesammelten Alttextilien werden in der EU wiederverwendet, hierfür werden die qualitativ hochwertigsten Alttextilien genutzt. (Huygens et al. 2023). In Deutschland können sogar nur 1-2 % der für die Wiederverwendung aussortierten Alttextilien über den Second-Hand-Markt verkauft werden (Wagner et al. 2022).

Für den weiteren Verbleib nach der Sortierung wurden im Rahmen der Textilstudie (bvse 2020) die in Abbildung 3-2 dargestellten Verwertungswege und Mengen für die Alttextilien aus Deutschland ermittelt. Grundsätzlich sollte eine Verwertung gemäß der 5-stufigen Abfallhierarchie erfolgen. Priorität ist demnach immer die Abfallvermeidung, zum Beispiel indem die Nutzungsdauer verlängert und die Nutzung intensiviert wird, d.h. weniger Kleidung, die nur im Schrank liegt. Die Verwertung von Alttextilien setzt bei der 2. Stufe ein, der Vorbereitung zur Wiederverwendung, gefolgt vom stofflichen Faserrecycling für verschiedene Anwendungsbereiche und der energetischen Verwertung. Zuletzt steht die reine Abfallbeseitigung bzw. Deponierung, welche in Deutschland nicht in Betracht kommt, da ein Deponierungsverbot für unbehandelte Haushaltsabfälle besteht (AbfAbIV) und ein Zugang zu energetischen Verwertungsanlagen vorhanden ist. Bei kleineren Sortierbetrieben findet häufig keine Sortierung für die stoffliche Verwertung statt, was zu einer direkten thermischen Verwertung der nicht wiederverwendbaren Textilien führt (Naji et al. 2023).

³ Dieses Thema kann auch Gründen der Fokussierung dieser Kurzstudie nicht ausführlicher behandelt werden.

Abbildung 3-2: Verwertungswege für Alttextilien aus Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung, Daten aus Wagner et al. (2022)

* Von den 62%, die als Second-Hand-Ware verkauft werden, geht letztlich nicht alles in die Wiederverwendung, ein nicht unerheblicher Teil wird in den Importländern anderweitig verwertet (stofflich oder energetisch) bzw. deponiert.

** Reißware entsteht durch das mechanische Zerreißen von Textilien zu Fasern.

Sortiersysteme

Das ökonomisch vorteilhafteste Geschäftsmodell der Alttextilienverwertung ist ein Weiterverkauf als Second-Hand-Mode. Bis zu 90 % der Einkünfte der Sortierunternehmen werden durch den wiederverwendbaren Anteil generiert (van Duijn et al. 2022). Der größte Teil der Sortierung findet bisher manuell statt.

Hierfür müssen die Alttextilien in mehrere hundert Kategorien sortiert werden, abhängig von Eigenschaften wie Qualität, Kleidungstyp, Farbe, Material, Größe, aber auch nach verschiedenen Modetrends und Wetterbedingungen, je nachdem in welchem Land die Second-Hand-Ware am Ende verkauft werden soll. Diese Sortierung kann bisher nur manuell durch speziell trainierte Mitarbeitende geleistet werden (Wagner et al. 2022).

In den letzten Jahren hat zunehmend auch die automatische Sortierung an Bedeutung gewonnen, diese befindet sich allerdings noch in der Entwicklungsphase. So werden in der EU weniger als ein Prozent der Alttextilien mit einem automatischen Verfahren sortiert (Huygens et al. 2023). Bei der Sortierung für ein anschließendes Recycling ist eine präzise Sortierung insbesondere nach der Faserzusammensetzung notwendig, während bei der Sortierung für die Wiederverwendung v.a. auf Artikel-Ebene sortiert wird. Für die Sortierung nach Fasern können automatische Sortierverfahren Verwendung finden, allerdings ist bisher die Fehlertoleranz bezüglich der

Materialzusammensetzung noch zu hoch. Einige Recyclingverfahren benötigen sehr definierte Faserzusammensetzungen im Inputstrom.

Tabelle 3-1: Automatische Sortierungsverfahren

Verfahren	Beschreibung	Aktuelle Hindernisse/ Grenzen	Anwendungsbeispiele
Spektroskopie-Technologie (hauptsächlich NIR = Nahinfrarot Spektroskopie)	<ul style="list-style-type: none"> Analyse der Materialzusammensetzung durch elektromagnetische Wellen Unterscheidung zwischen Kategorien wie 100 % Monomaterial, Materialmischungen (z. B. 40/60 % Baumwolle/Polyester) oder Materialfamilien (z. B. Zellulosefasern) 	<ul style="list-style-type: none"> Verwendung von mehr als 2 Materialarten führt zu Schwierigkeiten bei der Kategorisierung Erkennung von kleinen Anteilen von z. B. Elasthan Materialerkennung wird durch mehrschichtige Textilien oder dunkle Farben behindert 	<ul style="list-style-type: none"> Pilotanlage für automatisches Sortieren von Looper Textile Co. (H&M Gruppe und REMONDIS) in Polch (Deutschland) SIPTex (Schweden): Als Ergebnis eines schwedischen Forschungsprojekts betreibt sysav die erste automatische Sortieranlage im industriellen Maßstab (24000 t pro Jahr) NewRetex (Dänemark): Sortierunternehmen, welches bis 2025 40000 t Alttextilien pro Jahr mit NIR sortieren will
RFID- Technologie (Radio Frequency Identification)	<ul style="list-style-type: none"> Integration von digitalen Informationsträgern in Textilien Transparenz und Rückverfolgbarkeit über die ganze Wertschöpfungskette möglich Informationen zur Materialzusammensetzung, chemische Inhaltsstoffe oder angewendete Veredelungsverfahren wird für den digitalen Produktpass für Textilien diskutiert 	<ul style="list-style-type: none"> Kritische Marktgröße an Textilien mit RFID-Tags notwendig Infrastruktur zum Auslesen der Informationen noch nicht aufgebaut Für eine Implementierung benötigt es allgemein gültige Standards für alle Akteure in der Textilindustrie Auswirkungen auf den Recyclingprozess unklar 	<ul style="list-style-type: none"> Modemarken wie Inditex oder H&M nutzen die RFID-Technologie bereits für das Logistikmanagement im Lager und Store

Quelle: (Wagner et al. 2022; Huygens et al. 2023)

Fazit Sammlung und Sortierung von Alttextilien

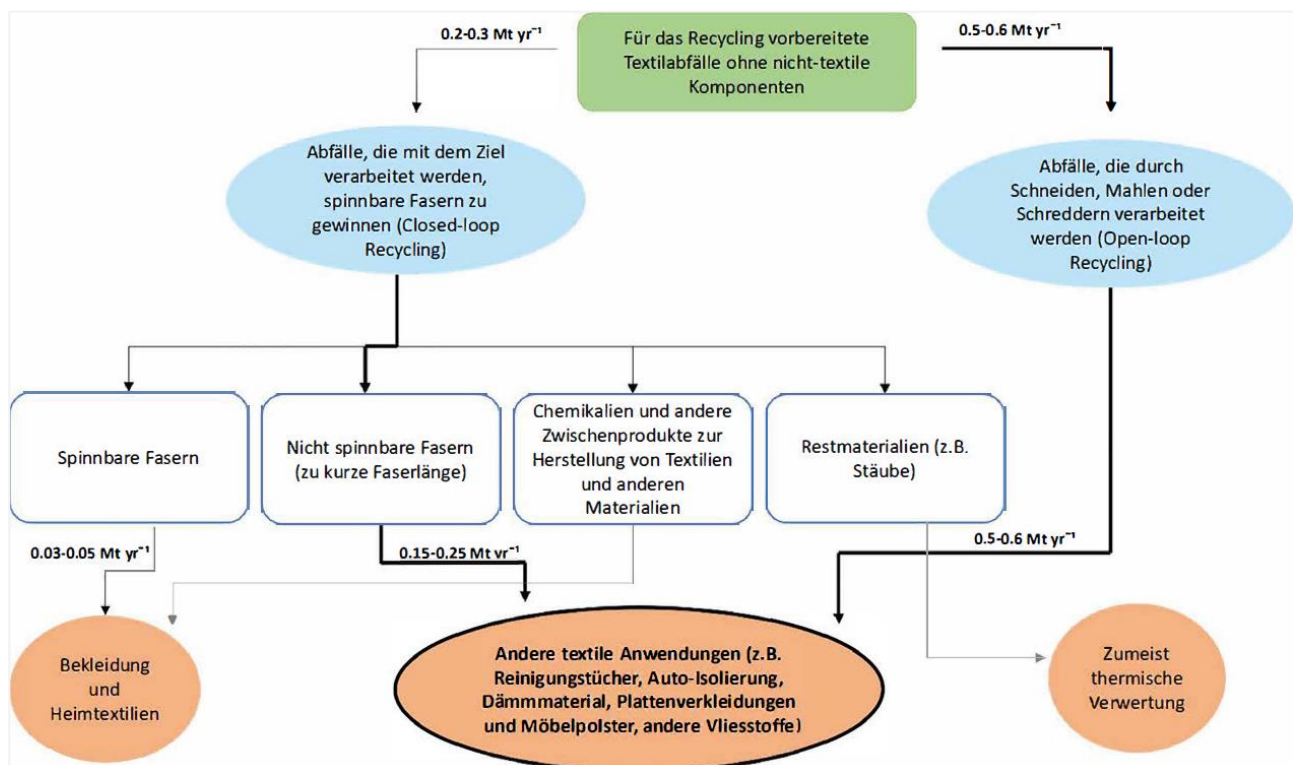
Die Sammelquote liegt in Deutschland bereits deutlich über dem europäischen Durchschnitt, die Zahlen werden – anders als in manchen anderen europäischen Ländern – allerdings geschätzt. Das

Sammelsystem ist gleichzeitig vor große Herausforderungen gestellt: Bisher wird das System fast ausschließlich durch den Verkauf der wiederverwendbaren Textilien finanziert. Bedingt durch den hohen manuellen Sortieraufwand ist die Wirtschaftlichkeit des Systems gefährdet, insbesondere durch die deutliche Qualitätsabnahme der gesammelten Textilien. Der Anteil an qualitativ minderwertigen Alttextilien wird durch die Einführung der Getrennterfassung von Textilien ab 2025 vermutlich ansteigen, während gleichzeitig ein höherer Preisdruck für den Verkauf von Second-Hand-Mode durch ein größeres Angebot auf dem deutschen Markt zu erwarten ist, denn der Anteil an Online-Plattformen, die einen privaten Verkauf von gebrauchter Bekleidung organisieren (z. B. [momox](#) oder [vinted](#)), steigt. Auch durch das Verbot der Vernichtung unverkaufter Ware im Rahmen der EU-Ökodesign-Verordnung (Ecodesign for Sustainable Products Regulation, ESPR) könnten die Mengen auf dem Second-Hand-Markt steigen. Dadurch gelangen weniger qualitativ hochwertige Altkleider in die Alttextilsammlung (Wagner et al. 2022).

3.2 Recycling von Alttextilien

In der EU belaufen sich laut Huygens et al. (2023) die recycelten Mengen aktuell auf ca. 0,7-0,85 Mio. t/Jahr. Den größten Anteil hat dabei die Weiterverarbeitung zu Putzlappen und zu Dämmmaterial oder Vliesstoffen für andere Sektoren wie beispielsweise der Automobilindustrie (Open-Loop-Recycling).

Abbildung 3-3: Schematischer Überblick über Alttextilflüsse in Open- und Closed-loop-Recyclingverfahren



Quelle: Huygens et al. (2023)

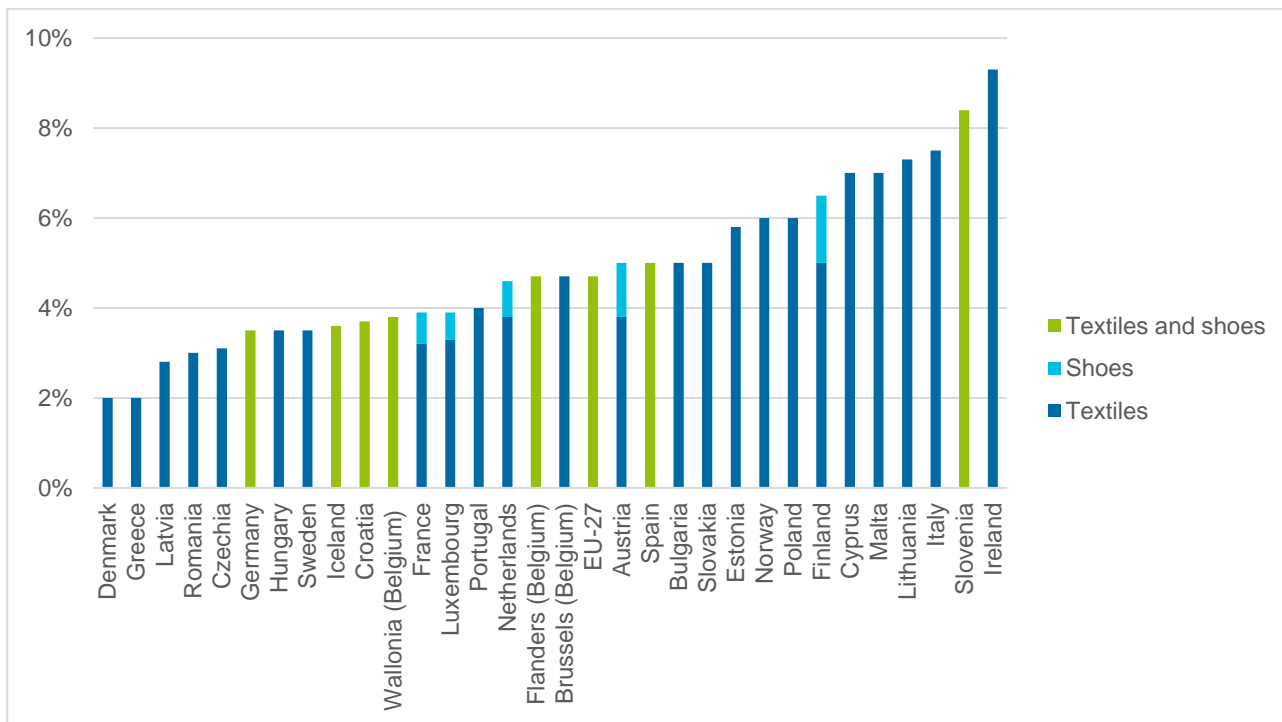
Es hat insbesondere ökonomische, aber auch logistische Gründe, z. B. kürzere Transportwege, dass mehr als zwei Drittel (vgl. Abbildung 3-3) der für das Recycling zur Verfügung stehenden textilen Abfälle in diesen Anwendungen – und damit außerhalb der Bekleidungs- und Textilindustrie –

Absatz finden. In Europa sind die meisten Textilrecyclingunternehmen in Italien, Frankreich, Spanien und den Niederlanden (in absteigender Reihenfolge) angesiedelt (Huygens et al. 2023).

Nur etwa 30 % der für das Recycling zur Verfügung stehenden textilen Abfälle dienen als Input für das F2F-Recycling (vgl. Abbildung 3-3). Letzten Endes können aus diesem Inputstrom aus technischen Gründen (insb. ausreichende Faserlänge) wiederum nur 16 % an spinnbaren Fasern gewonnen werden, was einem Anteil von etwa 5 % der Alttextilmenge, die für das Recycling in der EU zur Verfügung steht, entspricht. Neben textilen *post-consumer* Abfällen stellen textile Industrieabfälle (*post-industrial*) und unverkaufte Ware (*pre-consumer*) mindestens 50 % der Inputmaterialien für das F2F-Recycling dar (Huygens et al. 2023; Textile Exchange 2022). Im Schnitt werden daher für die Herstellung eines ähnlichen oder gleichen Produkts im Sinne eines Closed-loop-Recyclings global weniger als 1 % der gesammelten Alttextilien verwendet (Ellen McArthur Foundation 2017; Textile Exchange 2022).

Mit der Pflicht zur Getrennsammlung von Alttextilien ab 2025 wird die Menge an zur Verfügung stehenden Alttextilien in Deutschland voraussichtlich leicht, in EU-Ländern mit geringeren Sammelquoten stark zunehmen.⁴ Das zeigen die Mengen an Textilien im Hausmüll (Abbildung 3-4), die durch die Getrennterfassung theoretisch im separaten Alttextilstrom aufgehen.

Abbildung 3-4: Anteil von Textilien und Schuhen im Hausmüll



Quelle: European Environment Agency (2024)

In Kombination mit der zunehmenden Qualitätsabnahme der Bekleidung durch den Fast-fashion-Ansatz der Modeindustrie wird sich insbesondere der Anteil an Kleidung für die Wiederverwendung verringern und der Anteil, der für die stoffliche Verwertung als Rohware zur Verfügung steht,

⁴ Ab Mitte 2027 wird es ein Verbot der Ausfuhr von Textilabfällen aus der EU in Nicht-OECD-Länder geben (EU-Abfallverbringungsverordnung). Auch dann könnte die Menge der zur Verfügung stehenden Alttextilien in der EU steigen.

erhöhen. Die Gemeinschaft für textile Zukunft schätzt, dass die Getrennterfassungspflicht ab 2025 in der EU zu einem Anstieg der Sammelmengen um etwa 2 Mio. t von ca. 2,7 Mio. t pro Jahr auf 4,7 Mio. t pro Jahr führen wird (Bünemann und Kösegi 2019).

3.2.1 Kurze Einführung in Klassifizierung der Recyclingtechnologien

Die Recyclingtechnologien können in zwei Gruppen eingeteilt werden: Das werkstoffliche und das rohstoffliche Recycling. Die Gruppen unterscheiden sich insbesondere im Output: Durch rohstoffliches Recycling erhält man flüssige Kohlenwasserstoffgemische und Synthesegase, durch werkstoffliches Recycling feste Materialien wie Flocken, Pellets, Fasern bzw. komplexere, definierte Molekülstrukturen (Polymere oder Monomere). Werkstoffliches wird vor dem rohstofflichen Recycling priorisiert, was in dem benötigten Energieaufwand der Verfahren begründet ist.

Die hier verwendete Klassifizierung ist in Abbildung 3-5 dargestellt und wird im Folgenden kurz beschrieben. Längere Ausführungen und Beispiele folgen in Kapitel 3.2.2. Konkret wird unterschieden zwischen:

- **Werkstoffliche Verfahren**

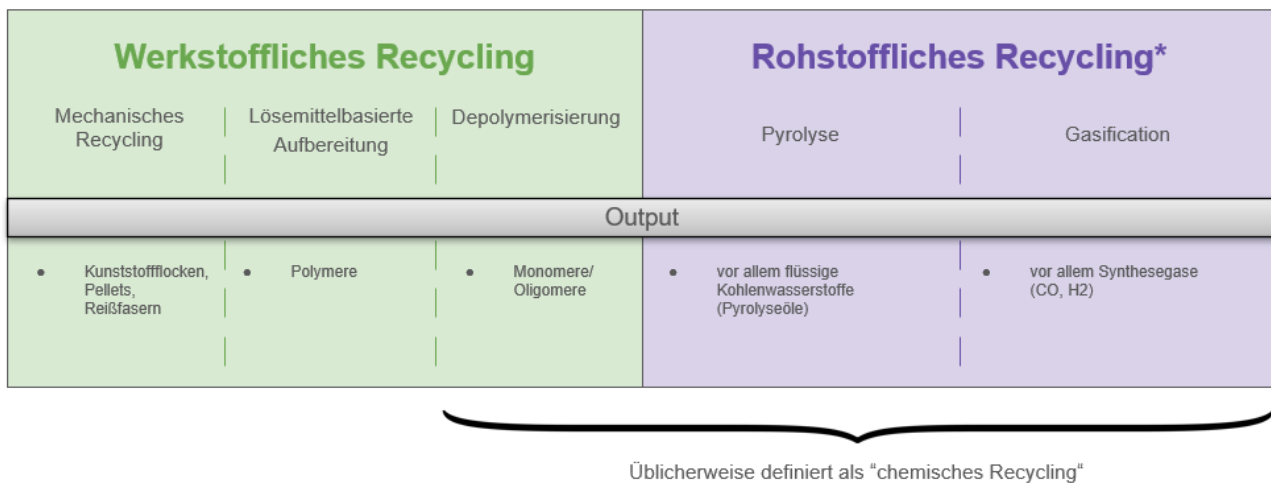
- **Mechanisches Recycling**, bei dem Textilabfälle sortiert und mit mechanischen Mitteln, z. B. Reißen, für die Weiterverarbeitung vorbereitet werden. Dieses ist mit einem Marktanteil von 65-87 %⁵ aktuell das dominierende Verfahren (Huygens et al. 2023).
- **Lösungsmittelbasierte Aufbereitung**, bei der ein oder mehr Zielmaterialien selektiv aus den Abfallmischungen und Verbundstoffen herausgelöst werden. Gemeint ist eine physikalische Auflösung ohne chemische Reaktion des Lösungsmittels mit der Polymerkette, die im Verlauf des Prozesses intakt bleibt. Auch unerwünschte Stoffe wie Farben können durch die Wahl des Lösungsmittels abgetrennt werden.
- **Depolymerisierung**, von einigen mit den rohstofflichen Recyclingverfahren unter dem Begriff „chemisches Recycling“ subsumiert. Bei Depolymerisierungen handelt es sich zwar durchaus um chemische Reaktionen, bei denen je nach genauer Einstellung des Prozesses auch eine gewisse erhöhte Reaktionstemperatur eingestellt wird. Gleichzeitig führen sie aber im Gegensatz zu den rohstofflichen Recyclingverfahren zu definierten, abtrennbaren Outputs, deren Weiterverarbeitung sowohl verfahrenstechnisch als auch energetisch weniger aufwendig ist. Bei diesen Verfahren werden ausgewählte, gut sortierte Faserarten in Monomere, d.h. definierte chemische Verbindungen, zerlegt, die wieder in der industriellen Produktion eingesetzt werden können. Typisch sind hydrolytische oder glykolytische Reaktionen, die in wässrigen oder organischen Lösemitteln stattfinden. Die Reaktionen können mittels Mikrowellen oder Katalysator unterstützt werden (siehe Beispiele in Kapitel 3.2.3).
- Für Fasergemische gibt es häufig **Verfahrenskombinationen**, bei denen eine Komponente der Fasermischung depolymerisiert wird und die andere abfiltriert/gelöst wird, z. B. Depolymerisierung von Baumwolle zu Glucose und Filtration der Polyester-Fasern oder Depolymerisierung von PET und lösemittelbasierte Aufbereitung der Zellulose.

⁵ 65 % Anteil bei Recyclingunternehmen < 5 t/Jahr oder mit unbekannter Kapazität; 87 % Anteil bei Recyclingunternehmen mit einer Kapazität von > 5 t/Jahr

- **Rohstoffliche Recyclingverfahren** oder thermo-chemische Verfahren, das heißt Pyrolyse und Gasification⁶, wobei für Alttextilien aktuell vor allem letzteres Verfahren eine Rolle spielt. Bei diesen Verfahren wird durch Hitzezufuhr die chemische Struktur der Faser in eine Reihe von undefinierten Kohlenwasserstoffen mit kurzer Kettenlänge zerlegt, daher der Begriff „thermo-chemisch“. Der Output dieses Verfahrens kann als Kohlenstoffbasis in der Chemieindustrie oder als Ersatzkraft-/brennstoff verwendet werden.

Der Begriff des „chemischen Recyclings“ ist nicht einheitlich definiert – von seiner Verwendung wird im Folgenden abgesehen. In der Debatte werden damit sowohl Verfahren aus dem werkstofflichen als auch die rohstofflichen Recyclingverfahren überschrieben (vgl. Abbildung 3-5), die aus Sicht der Autor*innen aufgrund ihrer unterschiedlichen Relevanz für das (Textil-)Recycling getrennt betrachtet werden sollten.

Abbildung 3-5: Klassifizierung der Recyclingtechnologien



*) Nur wenn die Outputs zur weiteren Verwendung in die chemische Industrie fließen. Der Anteil, der als Kraftstoff genutzt wird, wird als energetische Verwertung gewertet.
Quelle: Eigene Darstellung.

3.2.2 Überblick über Technologien

Nachfolgend werden die am Markt vorkommenden Recyclingverfahren mit ihren jeweiligen Input- und Output-Materialien, Output-Qualitäten, dem technologischen Reifegrad (TRL)⁷, technologischen Einschränkungen sowie Beispielunternehmen basierend auf Huygens et al. (2023) vorgestellt. Hierbei wird zwischen werkstofflichem und rohstofflichem Recycling unterschieden. Im Anhang (Seite 44) befinden sich schematische Darstellungen aller Recyclingverfahren.

⁶ „Gasification“ wird im Deutschen auch mit „Vergasung“ übersetzt. Die Autor*innen haben sich wegen der Vorprägung des übersetzten Begriffs für die Verwendung des englischen Wortes entschieden.

⁷ Der technologische Reifegrad wurde ursprünglich von der NASA zur Beurteilung des Entwicklungsstands von neuen Raumfahrttechnologien eingeführt. Er bewertet den Entwicklungsstand von Technologien auf einer Skala von 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) bis 9 (qualifizierter und erfolgreicher Einsatz der Technologie).

Vorbereitende Schritte

Jedem Recyclingverfahren sind vorbereitende Schritte vorangestellt, aber nicht bei jedem Recyclingverfahren sind alle im Folgenden genannten Vorbereitungen nötig:

- Entfernung von nicht textilen Bestandteilen (Reißverschlüsse, Knöpfe, Labels)
- Teilweise Entfernung von Farbstoffen und Ausrüstungen, Bleichen des Inputs
- Trocknen von nassen Materialien
- Zerkleinern der Alttextilien, damit eine homogene Masse entsteht
- Teilweise industrielle Reinigung/Desinfektion

Werkstoffliches Recycling

Werkstoffliches Recycling umfasst das mechanische Recycling, die Lösungsmittelbasierte Aufreinigung und die Depolymerisierung. Im Folgenden sind alle drei Verfahren in je einer Tabelle dargestellt, wobei es mehrere Verfahren pro Recycling-Typ gibt. Diese unterscheiden sich vor allem, welcher Inputstrom verarbeitet werden kann.

Tabelle 3-2: Mechanisches Recycling

Input	Alle Textilien, die einen vorherrschenden Fasertyp haben, bevorzugt Textilien mit einem hohen Baumwoll- oder Wollanteil		Ausschließlich thermoplastische Textilabfälle mit hoher Reinheit (z. B. PET, PA6, PA6,6 und PP) oder Plastikabfälle aus anderen Sektoren (z. B. PET-Flaschen) <i>thermo-mechanisches Verfahren⁸</i>
Hauptintention des Recyclings	Open-loop Recycling	Spinnbare Fasern als Output	
vorbereitende Schritte	<ul style="list-style-type: none"> • Entfernung von nicht textilen Bestandteilen (Reißverschlüsse, Knöpfe, Labels) • Teilweise industrielle Reinigung/Desinfektion 		
Können Fasermischungen verarbeitet werden?	Grundsätzlich ja, meistens wird ein Anteil von > 50 % Baumwolle gefordert.	Nein, unterschiedliche Eigenschaften der Fasermischung limitieren den Einsatz für den Bekleidungssektor, hierfür wäre eine weitere chemische Auflösung notwendig.	Nein, das Inputmaterial darf nur aus einem Polymertyp oder kompatiblen Polymertypen zusammengesetzt sein.

⁸ Dies ist in den meisten Fällen identisch mit dem mechanischen Kunststoffrecycling. Fasern werden eingeschmolzen, siehe auch Abbildung 7-1 im Anhang.

Input	Alle Textilien, die einen vorherrschenden Fasertyp haben, bevorzugt Textilien mit einem hohen Baumwoll- oder Wollanteil		Ausschließlich thermo-plastische Textilabfälle mit hoher Reinheit (z. B. PET, PA6, PA6,6 und PP) oder Plastikabfälle aus anderen Sektoren (z. B. PET-Flaschen) <i>thermo-mechanisches Verfahren⁹</i>
Hauptintention des Recyclings	Open-loop Recycling	Spinnbare Fasern als Output	
Output/Anwendungsbereich	<ul style="list-style-type: none"> • Industrielle Putzlappen • Kurze Fasern für Vliesstoffe (Isolationsmaterial, Filter, Polsterherstellung...) 	<ul style="list-style-type: none"> • Lange spinnbare Fasern für die Garnherstellung, • Kurze Fasern gehen ins Open-loop-Recycling 	<ul style="list-style-type: none"> • Synthetische Fasern für den Bekleidungssektor oder andere textile Anwendungen • Granulat für Anwendungen außerhalb des Textilssektors, z. B. Automobilindustrie
Aktueller technologischer Reifegrad	<ul style="list-style-type: none"> • TRL 9 • Dominierendes Recyclingverfahren für Alttextilien 	<ul style="list-style-type: none"> • TRL 9 • Verfahren traditionell für Vliesherstellung ausgelegt, F2F-Recycling ist noch in der Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> • TRL 7⁹ bei der Verwendung von textilen Industrieabfällen als Input • TRL 9 bei Plastikabfällen aus anderen Sektoren
Verwertungsgrad (im Verhältnis zum Input)	<i>Keine Daten verfügbar</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Natürliche, spinnbare Fasern: 5-20 % • Synthetische spinnbare Fasern: 25-55 % 	<i>Keine Daten verfügbar</i>
Qualität des Outputs hinsichtlich einer Wiederverwendung als Textilfaser	Es findet ein Downcycling statt, die Fasern können nicht für die Herstellung von Garnen für die Bekleidung genutzt werden.	<ul style="list-style-type: none"> • Rezyklierte Fasern haben eine geringere Qualität als Frischfasern und müssen mit anderen Fasern vermischt werden • Anteil rezyklierter Fasern variiert je nach Anwendung (z. B. bei Jeans höherer Anteil möglich als bei Blusen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Qualität der Polymere verschlechtert sich mit jedem Recyclingzyklus • Anteil rezyklierter Fasern von etwa 20 % möglich
Einschränkungen	Eventuelle Kontaminationen sowie Farben bleiben erhalten (untergeordnet relevant für den Anwendungsbereich).	<ul style="list-style-type: none"> • Eventuelle Kontaminationen sowie Farben bleiben erhalten. <ul style="list-style-type: none"> ➔ Sortierung nach Farben notwendig ➔ Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte ist fraglich (vgl. auch Kapitel 4, Herausforderungen auf Recyclingebene). 	

⁹ Technologischer Reifegrad (TRL) 7: Prototyp im Einsatz (1–5 Jahre)

Input	Alle Textilien, die einen vorherrschenden Fasertyp haben, bevorzugt Textilien mit einem hohen Baumwoll- oder Wollanteil	Ausschließlich thermo-plastische Textilabfälle mit hoher Reinheit (z. B. PET, PA6, PA6,6 und PP) oder Plastikabfälle aus anderen Sektoren (z. B. PET-Flaschen) <i>thermo-mechanisches Verfahren⁸</i>	
Hauptintention des Recyclings	Open-loop Recycling	Spinnbare Fasern als Output	
		<ul style="list-style-type: none"> Eingeschränkte Möglichkeit zu einem erneuten Recycling (ca. auf 3 Recyclingkreisläufe limitiert) Materialien, die laminiert, beschichtet oder bedruckt sind oder einen hohen Elasthan-Gehalt haben, sind ungeeignet. 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Reinheit des Inputmaterials ist notwendig. Manche Ausrüstungen oder Pigmente können das Verfahren stark behindern bzw. verhindern und die Qualität reduzieren. Alttextilien sind zumeist kein geeignetes Inputmaterial, da sie momentan nicht in einer ausreichenden Faserreinheit sortiert werden können.
Beispiele	<ul style="list-style-type: none"> Altex Textil Recycling (Deutschland), ca. 36 kt/Jahr, hauptsächlich Open-Loop-Recycling SOEX Recycling Germany GmbH (Deutschland), ca. 11 kt/Jahr (Huygens et al. 2023), hauptsächlich Open-Loop-Recycling Wolkat (Niederlande, Recycling in Marokko), ca. 9-30 kt/Jahr, hauptsächlich Closed-Loop-Recycling 	Antex (Spanien), Verwendung sowohl von Alttextilien als auch von Industrieabfällen	

Quelle: eigene Zusammenstellung basierend auf Huygens et al. (2023); Wagner et al. (2022)

Tabelle 3-3: Lösungsmittelbasierte Aufbereitung

Klassifizierung nach Input	Polyester-Baumwoll-Gemische	Anteil von mindestens 50 % Baumwolle/Zellstoff; je höher, desto besser
Vorbereitende Schritte	<ul style="list-style-type: none"> Entfernung von nicht textilen Bestandteilen (Reißverschlüsse, Knöpfe, Labels) Entfernung von Farbstoffen und Ausrüstungen, Bleichen des Inputs 	
Können Fasermischungen verarbeitet werden?	Abhängig vom spezifischen Verfahren, meistens kann eine Kontamination mit weiteren Fasermaterialien (Wolle, Elasthan...) bis zu einem kleinen Anteil toleriert werden.	Abhängig vom spezifischen Verfahren kann ein unterschiedlicher Anteil an Fremdstoffen toleriert werden, es wird aber aktuell zumeist nur der Baumwollanteil gelöst und weiterverarbeitet.

Output/Anwendungsbereich	<ul style="list-style-type: none"> • PET-Polymere • Zellstoff für die Herstellung von Garnen 	Zellstoff als Input für die Papier- oder Garnherstellung (regenerierte Fasern: Viscose, Modal, Lyocell), für die Garnherstellung wird der Zellstoff meistens mit Holzzellstoff (meistens mindestens 50 %) vermischt.
Aktueller technologischer Reifegrad	<ul style="list-style-type: none"> • TRL 5-6¹⁰ • Das Verfahren ist noch nicht im industriellen Maßstab verfügbar. 	<ul style="list-style-type: none"> • TRL 7-9 für baumwollreiche Inputströme • TRL 9 bis 2025 erwartet
Verwertungsgrad (Im Verhältnis zum Input)	<i>Keine Daten verfügbar</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängig vom Baumwollanteil im Inputstrom
Qualität des Outputs hinsichtlich einer Wiederverwendung als Textilfaser	Qualität ist vergleichbar zu einer Frischfaser, jedoch verkürzt sich die Polymerkette mit jeder Wiederholung des Recyclingprozesses, die Qualität nimmt ab.	
Einschränkungen	Energieintensive chemische Vorbehandlung (Bleichen, Entfernen von Kontaminationen) notwendig	<ul style="list-style-type: none"> • Effizienz ist nur mit sehr hohem Baumwollanteil gegeben. • Anteil an geeignetem Input ist gering. • Energieintensive chemische Vorbehandlung (Bleichen, Entfernen von Kontaminationen) ist notwendig.
Beispiele	WornAgain , Demoanlage in der Schweiz mit max. 1000 t/Jahr, in kommerziellen Anlagen voraussichtlich 50-100 kt/Jahr möglich	<ul style="list-style-type: none"> • Renewcell/Circulose¹¹, Herstellung von Zellstoff hauptsächlich aus textilen Industrieabfällen, industrielle Anlage hatte Kapazität von 60 kt/Jahr. • Södra, im OnceMore®-Prozess können 6000 t Zellstoff pro Jahr aus Alttextilien hergestellt werden.

Quelle: Eigene Zusammenstellung basierend auf Huygens et al. (2023); Duhoux et al. (2021)

¹⁰ TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung; TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung

¹¹ Renewcell musste zwischenzeitlich Insolvenz anmelden, hat jetzt aber einen neuen Investor gefunden: „Aus Renewcell wird Circulose“, Pressemitteilung vom 06.06.2024, abrufbar unter: [Investor Altor übernimmt insolventen Recycling-Pionier: Aus Renewcell wird Circulose \(textilwirtschaft.de\)](#)

Tabelle 3-4: Depolymerisierungsverfahren

Klassifizierung nach Input	Unterschiedliche Baumwoll-Polyester-Gemische oder auch reiner Baumwoll- oder Polyester-Input mittels... <i>Hydrothermisches Verfahren</i>	Unterschiedliche Baumwoll-Polyester-Gemische oder auch reiner Baumwoll- oder Polyester-Input mittels... <i>Enzymatische Depolymerisierung</i>	Materialien aus mindestens 80-90 %PET oder PA6 ()
Vorbereitende Schritte	<ul style="list-style-type: none"> Entfernung von nicht textilen Bestandteilen (Reißverschlüsse, Knöpfe, Labels) Zerkleinern der Alttextilien, damit eine homogene Masse entsteht Teilweise Entfernung von Farbstoffen und Ausrüstungen, Bleichen des Inputs 		
Können Fasermischungen verarbeitet werden?	Abhängig vom spezifischen Verfahren, meistens kann eine Kontamination mit weiteren Fasermaterialien (Nylon, Wolle, Elasthan...) und Veredelungen und Beschichtungen bis zu einem kleinen Anteil toleriert werden.		
Output / Anwendungsbereich	Unterschiedliche Outputs je nach spezifischen Verfahren (zumeist Verfahrenskombinationen aus Depolymerisierung und lösemittelbasierter Aufbereitung): <ul style="list-style-type: none"> Zellstoff oder Zellulosepulver, die zu regenerierten Fasern weiterverarbeitet werden können Polyester-Fasern oder PET-Monomere, die wieder repolymerisiert werden können 	<ul style="list-style-type: none"> Glucose (Monomer) und Zellulosepulver (weitere Aufarbeitung zur Verwendung in der chemischen Industrie oder als Plastik) PET-Fasern oder PET-Monomere 	<ul style="list-style-type: none"> Monomere, die zu rPET und rPA6 weiterverarbeitet werden
Aktueller technologischer Reifegrad	<ul style="list-style-type: none"> TRL 6-7 Erwartungsgemäß wird TRL 9 2023/2024 erreicht¹² 	<ul style="list-style-type: none"> TRL 9 ab 2023 erwartet¹³ 	<ul style="list-style-type: none"> TRL 9 für PA6-Textilien, TRL 4 – 9 für PET-Recycling Theoretisch können viele Polymere depolymerisiert werden, im industriellen Stil wird es nur für PET und PA6 entwickelt
Verwertungsgrad (im Verhältnis zum Input)	Abhängig vom Reinheitsgrad des Inputstroms		

¹² Es liegen keine aktuellen Informationen vor.

¹³ Es liegen keine aktuellen Informationen vor.

Klassifizierung nach Input	Unterschiedliche Baumwoll-Polyester-Gemische oder auch reiner Baumwoll- oder Polyester-Input mittels... <i>Hydrothermisches Verfahren</i>	Unterschiedliche Baumwoll-Polyester-Gemische oder auch reiner Baumwoll- oder Polyester-Input mittels... <i>Enzymatische Depolymerisierung</i>	Materialien aus mindestens 80-90 %PET oder PA6 ()
Qualität des Outputs hinsichtlich einer Wiederverwendung als Textilfaser	Abhängig vom Verfahren, Frischfaserqualität kann erreicht werden.	Qualität der Regeneratfaser aus Zellstoff vergleichbar mit Frischfaser; PET-Fasern weisen eine geringere Qualität auf und werden mit fossilem PET vermischt (meistens 20 % rPET und 80 % fossiles PET).	<ul style="list-style-type: none"> • Es wird rPET und rPA6 in Frischfaserqualität erhalten, der Prozess kann beliebig oft durchgeführt werden. • Anwendungen sowohl im Textilsektor als auch außerhalb (Automobilindustrie oder Verpackungen)
Einschränkungen	Eine gute Vorsortierung und Wissen über die Zusammensetzung auf Faser-Ebene und enthaltenen Chemikalien ist notwendig, um die Verfahren richtig einstellen zu können.		
	Hohe (Energie-)Kosten, je nachdem, wie viele zusätzliche Reinigungsschritte durchgeführt werden müssen.	<i>Keine Daten verfügbar</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Der Massenanteil an geeigneten Alttextilien ist aktuell gering. • Hohe (Energie-)Kosten, je nachdem wie viele zusätzliche Reinigungsschritte durchgeführt werden müssen. • Für ein effizientes Recycling ist eine hohe Reinheit des Inputmaterials erforderlich. • Für PET: hauptsächlich Verwendung von Verpackungsmaterialien, Verwendung von Alttextilien als Input noch in der Entwicklungsphase Für PA6: hauptsächlich Teppiche, Fischernetze und Industrieabfälle, Alttextilien können auch verwendet werden.
Beispiele	HKRITA (Hong Kong Research Institute of Textiles and Apparel) mit dem Green Machine-Projekt , erste industrielle Anwendung in Indonesien mit 1,5 t/Tag	<ul style="list-style-type: none"> • Carbios (Frankreich), Fokus auf enzymatische Depolymerisierung von PET, industrielle Demonstrationsanlage 2021 mit einer Kapazität von 40 kt/Jahr eröffnet • HKRITA (Hong Kong Research Institute of Textiles and Apparel) 	Aquafil (Italien), Herstellung von Econyl® , Kapazität von etwa 50 kt/Jahr, davon ca. 5 kt aus Alttextilien, der Rest aus Fischernetzen, Verpackungen, Teppichen und anderem Ozeanmüll (und weitere siehe Kapitel 3.2.3)

Quelle: Eigene Zusammenstellung basierend auf Huygens et al. (2023) und Duhoux et al. (2021)

Rohstoffliches Recycling

Grundsätzlich gibt es zwei rohstoffliche Recyclingverfahren, die Pyrolyse (flüssiger Output) und die Gasification (gasförmiger Output). Pyrolyse wird momentan nicht für das Recycling von Alttextilien verwendet (sondern für u.a. Kunststoffabfälle), daher liegt im Folgenden der Fokus auf der Gasification. Allerdings ist dies auch noch kein gängiges Verfahren: In der Praxis sind Teppiche das einzige textile Material, das als Input für dieses Verfahren bekannt ist (siehe Beispiel in

Tabelle 3-5).

Tabelle 3-5: Rohstoffliches Recycling / Gasification

Klassifizierung	Gasification
Vorbereitende Schritte	<ul style="list-style-type: none"> Entfernung von nicht textilen Bestandteilen (Reißverschlüsse, Knöpfe, Labels) Trocknen von nassen Materialien Zerkleinern der Alttextilien, damit eine homogene Masse entsteht
Input	<ul style="list-style-type: none"> Jegliche Art von organischem und kohlenstoffbasiertem Material (neben Alttextilien auch Biomasse und Plastikabfälle) PVC und Polyamide (PA) nur in kleinen Mengen Fokus auf Plastik und Alttextilien aus Polyester und Polyestergermischen
Können Fasermischungen verarbeitet werden?	Ja, in diesen Prozess können heterogene und kontaminierte Alttextilien eingespeist werden.
Output/Anwendungsbe- reich	<ul style="list-style-type: none"> Vor allem Synthesegase (CO, H₂) Anwendung hauptsächlich in der Kraftstoffproduktion Verwendung in der chemischen Industrie (nach weiteren Veredelungsschritten) möglich, wo es dann zusammen mit Holzzellstoff weiter zu Fasern für den Textilsektor gesponnen werden kann
Aktueller technologischer Reifegrad	<ul style="list-style-type: none"> TRL 9, aber: Es existieren zwar bereits industrielle Anlagen für Biomasse, Plastikabfälle und Alttextilien, der Fokus auf eine weitere Anwendung in der chemischen Industrie ist aber relativ jung.
Qualität des Outputs hinsichtlich einer Wiederverwendung als Textilfaser	<ul style="list-style-type: none"> Es können reine, nicht kontaminierte Monomere produziert werden, die wiederum in der Textilproduktion zum Einsatz kommen können.
Einschränkungen	<ul style="list-style-type: none"> Die Zusammensetzung des Inputs beeinflusst den entstehenden Produktmix, weshalb auch hier die genaue Zusammensetzung des Inputs bekannt sein muss. Der Prozess ist sehr energieintensiv, da hohe Temperaturen für die Gasification erreicht werden müssen. Zum Nachweis von Rezyklat aus diesem Verfahren sind Massenbilanzierungsfragen zu klären.¹⁴

¹⁴ Bei allen Recyclingtechnologien, bei denen Mono- oder Polymere gewonnen werden, die direkt in Produktionsprozessen verwendet werden können (werkstoffliches Recycling), ist die Rückverfolgbarkeit recht einfach. Handelt es sich bei dem Output jedoch um ein Kohlenwasserstoffgemisch, das in einen Raffinierungsprozess für Rohöl eingespeist werden muss, in mehreren Stufen mit neuen Rohstoffen vermischt wird und schließlich in eine Vielzahl von Produkten und Outputs mündet (rohstoffliches Recycling), stoßen die gängigen Bilanzierungsmethoden an ihre Grenzen. Um gegenüber den nachgelagerten Akteuren der Lieferkette und den Kunden glaubwürdige und gültige Angaben über einen bestimmten Recyclinganteil machen zu können, muss den Endprodukten ein bestimmter Recyclinganteil zugewiesen werden. Dafür gibt es sogenannte Chain-of-Custody Modelle (ISO 22095:2020). Eine Erläuterung dieser würde an dieser Stelle zu weit führen. Wichtig ist jedoch, eine sogenannte Allokationsmethode zu wählen, die die tatsächlichen Stoffströme der beteiligten Prozesse widerspiegelt.

Beispiele

- [Eastman Carbon Removal Technology](#) (USA), Verwertung von gemischten Plastikabfällen (u. a. Teppiche) zu Monomeren, die zusammen mit Holzzellstoff (60 %) zu regenerierten Fasern verarbeitet werden (Naia™)

Quelle: Eigene Zusammenstellung basierend auf Huygens et al. (2023) und Duhoux et al. (2021)

Vergleich der Recyclingtechnologien

Die folgende Tabelle (Tabelle 3-6) fasst die Stärken und Schwächen der Recyclingtechnologien zusammen.

Tabelle 3-6: Stärken und Schwächen der verschiedenen Recyclingtechnologien

Recyclingtechnologie	Stärken	Schwächen
Mechanisches Recycling	<ul style="list-style-type: none"> + Industrieller Maßstab + Geringer Energiebedarf 	<ul style="list-style-type: none"> - Qualitätsverlust der Fasern beim Recycling --> überwiegend Open-loop-Verwertung (Putzlappen, Dämmmaterial, Vliesstoffe) - Hohe Anforderungen an den Inputstrom
Lösemittelbasierte Verfahren & Depolymerisierungsverfahren (die Verfahren werden häufig in Kombination angewendet)	<ul style="list-style-type: none"> + Mit Rezyklaten aus diesen Verfahren sind Qualitäten vergleichbar zur Neuware erreichbar + Auftrennung von Mischgeweben möglich + Faserlänge des Inputs nicht entscheidend 	<ul style="list-style-type: none"> - Noch nicht im industriellen Maßstab etabliert - Hoher Energiebedarf, teilweise hoher Chemikalieneinsatz - Je nach Verfahren hohe Anforderungen an Inputstrom (Der Massenanteil an geeigneten Alttextilien ist aktuell gering) - Weitere Daten zur ökobilanziellen Bewertung notwendig - Aus Mischgeweben wird häufig nur eine Komponente zurückgewonnen
Gasification (Rohstoffliches Recycling)	<ul style="list-style-type: none"> + Geringe Anforderungen an Inputstrom, Verwertung von Reststoffen, für die eine stoffliche Verwertung nicht möglich ist + Erzeugung von Monomeren über den „Umweg“ undefinierter Kohlenwasserstoffe, allerdings: Mit Rezyklaten aus diesen Verfahren ist eine Qualität vergleichbar mit der von Neuware erreichbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr hoher Energie- und Prozessaufwand --> hohe Umweltbelastung - Zum größten Teil Open-loop-Recycling (Output wird bisher v. a. als Kraftstoff verwendet) - Bisher kein etabliertes Verfahren für Textilabfälle - Zum Nachweis von Rezyklat aus diesem Verfahren sind Massenbilanzierungsfragen zu klären (siehe Fußnote 14)

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Um das Recycling und die Verwendung von Rezyklat aus Alttextilien in der Neuware zu steigern, haben alle Ansätze für bestimmte Massenströme ihre Berechtigung. Die Technologien komplementieren einander also, sodass für eine möglichst nachhaltige Lösung ein integrativer Ansatz mit einer

sinnvollen Aufteilung der Recyclingströme auf die einzelnen Technologien erforderlich ist (Naji et al. 2023; Duhoux et al. 2021).

Hierbei ist folgende Priorisierung der Recyclingverfahren im Sinne der Abfallhierarchie zu beachten, die sich aus den technischen und energetischen Aufwänden der Verfahren und den Potenzialen ergeben:

Mechanisches Recycling > lösemittelbasierte Aufarbeitung ≈ Depolymerisierung > rohstoffliches Recycling

Nach der Darstellung der Herausforderungen und Lösungsansätze (Kapitel 4) sowie der Bewertung (Kapitel 5) erfolgt im Fazit eine ausführlichere Begründung für diese Priorisierung.

3.2.3 Beispiele

Im Folgenden werden ausführlich vier Beispiele mit verschiedenen Recyclingtechnologien genannt.

Mechanisches Recycling

- **Unternehmen:** [Wolkat](#)
 - **Hauptsitz:** Niederlande, Sortierung und Recycling auch in Marokko
 - **Ansatz:** Wolkat vereint alle Schritte der Textilverarbeitung aus sekundären Rohstoffen von der Sammlung bis zur Herstellung von Garnen, Stoffen und Endprodukten:
 - o Sammlung von Alttextilien in den Niederlanden (Ausweitung auf andere europäische Länder bis 2025 geplant)
 - o Vorsortierung nach Wiederverwendung oder stofflicher Verwertung in den Niederlanden, Belgien und Dänemark (Wiederverwendung (in % der Sammelmenge): 50 % Kleidung, 12 % Schuhe, 15 % direkte Wiederverwendung des Materials z. B. als Putzlappen oder Kissenfüllung)
 - o Weitere Sortierung für die stoffliche Verwertung in Marokko (in % der Sammelmenge): 10 % Garne, 9 % nicht textile Anwendungen/Mliesstoffe, 4 % Abfall
 - o Herstellung der Garne aus 80 % Rezyklat (aus Baumwolle oder synthetischen Fasern, wobei jeweils bis zu 15 % andere Fasern enthalten sein können) und 20 % neuwertigem Polyester
 - **Was ist besonders?** Expliziter Fokus auf einem geschlossenen Kreislauf, es werden ausschließlich Alttextilien als Input verwendet und die Verwertung wird im Sinne der Abfallhierarchie mit dem Ziel durchgeführt, möglichst viel der aus der stofflichen Verwertung wieder für den Textilsektor verwenden zu können
 - **Kapazität:** 35-45 t Alttextilien/Tag je nach Zusammensetzung und Aufbau der Alttextilien
-

Weitere Unternehmen, die mechanisches Recycling durchführen sind u.a.:

- Associazione Tessile Riciclato Italiana (Italien), Fokus auf Wolle und Kaschmir
- ETS H. Moncorgé (Frankreich), verschiedene Anwendungsbereiche (Automobilindustrie, Bekleidung, Geotextilien usw.)
- Frankenhuis B.V. (Boer Group, Niederlande), hauptsächlich Open-loop-Recycling
- Procotex (Belgien), ausschließlich Open-loop-Recycling
- Recover (Spanien), Fokus auf Baumwolle und Closed-loop-Recycling
- Rester (Finnland), verschiedene Anwendungsbereiche (Garne, Dämmmaterial, Filter usw.)

Depolymerisierung von Polyamid

- **Projekt:** Herstellung einer Jacke aus 100 % Textilabfällen mittels sog. [loopamid®](#)-Technologie
 - **Beteiligte Unternehmen:** BASF (Entwicklung der sog. loopamid®-Technologie), Inditex (Entwicklung der Jacke nach einem „Design für Recycling“-Ansatz)
 - **Ansatz:** Zusammenarbeit mit verschiedenen Unternehmen, um alle Bekleidungskomponenten (Reißverschlüsse, Klettverschlüsse, Etiketten, Nähgarne, Füllmaterialien) aus loopamid® zu fertigen. Loopamid® ist ein recyceltes Nylon-6-Garn, das durch die Depolymerisierung von textilen Industriesteren und Alttextilien hergestellt wird.
 - **Was ist besonders?** Loopamid® ist das erste recycelte Nylon 6, das ausschließlich auf Textilabfällen basiert. Durch den „Design für Recycling“-Ansatz von Inditex wird ein erneutes Recyceln erleichtert, da alle Bestandteile aus dem gleichen Material (loopamid®) bestehen. Bemerkenswert ist der Einbezug aller Bekleidungskomponenten und nicht nur der textilen Anteile.
-

Depolymerisierung von Polyester

- **Projekt:** Upscaling von einem F2F-Recycling von Polyester mittels eines Depolymerisierungsverfahrens
 - **Beteiligte Unternehmen:** Die H&M-Gruppe hat zusammen mit der Vargas Holding das Unternehmen [Syre](#) initiiert.
 - **Ansatz:** 2024 baut Syre die erste Recyclinganlage in North Carolina mit dem Ziel, bis 2032 insgesamt 12 Anlagen weltweit aufzubauen. Durch das Depolymerisierungsverfahren ist die Qualität des rezyklierten Polyesterergarns gleichwertig zu Polyester aus fossilen Quellen. Die H&M-Gruppe hat einen Abnahmevertrag von insgesamt 600 Millionen USD über 7 Jahre mit dem Ziel abgeschlossen, den Großteil ihres Bedarfs an recyceltem Polyester aus F2F-Recycling zu beziehen.
 - **Was ist besonders?** Der Recycling-Ansatz von Syre ist ein Closed-loop-Ansatz, bei dem ausschließlich Alttextilien sowie textile Produktionsabfälle als Input für den Recyclingprozess verwendet werden. Hierdurch unterscheiden sie sich von dem sonst üblichen Recycling von PET-Getränkeflaschen (vgl. Kapitel 3.2). Das Recycling von Polyester aus Textilien im industriellen Maßstab ist zudem äußerst relevant, da in Europa Polyester in Alttextilien nach Baumwolle den größten Anteil ausmacht (Huygens et al. 2023) und weltweit die am häufigsten genutzte Textilfaser mit 60 Millionen Tonnen/Jahr ist (Textile Exchange 2022).
 - **Kapazität:** Geplant sind 3 Millionen Tonnen rezykliertes Polyester bis 2032.
-

Enzymatische Depolymerisierung von Polyester

- **Unternehmen:** [Carbios](#)
 - **Hauptsitz:** Frankreich
 - **Ansatz:** Carbios hat ein innovatives Verfahren entwickelt, mit dem mittels enzymatischer Depolymerisierung Polyester sowohl aus Plastikabfällen als auch aus Alttextilien in einer Qualität rezykliert werden kann, die vergleichbar zu PET aus fossilen Quellen ist.
 - **Was ist besonders?** Mittels des Verfahrens können verschiedene Plastikabfälle verarbeitet werden. Die durch die Depolymerisierung entstehenden PET-Monomere werden so gereinigt, dass daraus wieder „jungfräuliches“ PET hergestellt werden kann. Dies ermöglicht die Herstellung von Produkten aus 100 % rezykliertem PET; sogar ein Upcycling von Alttextilien zu klaren PET-Flaschen ist möglich. Im Vergleich zu anderen Depolymerisierungsverfahren werden beim enzymatischen Verfahren weniger Chemikalien und Lösungsmittel für den Depolymerisierungsprozess benötigt, wodurch die Umweltauswirkungen verringert werden können. Für die Repolymerisation, die für die weitere Verwendung der depolymerisierten Monomere notwendig ist, werden wiederum Chemikalien benötigt (Duhoux et al. 2021). Im Vergleich zu diesem Verfahren schneidet das mechanische Recycling bezüglich der Umweltauswirkungen
-

besser ab, hierbei kommt es jedoch zu einer Qualitätsabnahme der PET-Fasern, wodurch keine Produkte aus 100 % mechanisch rezykliertem PET hergestellt werden können (Huygens et al. 2023).

- **Kapazität:** 2021 eröffnete Carbios eine industrielle Demonstrationsanlage in Frankreich. Hierdurch soll das nötige Wissen aufgebaut werden, um die Inbetriebnahme einer ersten industriellen Einheit vorzubereiten.

Über die beschriebenen Beispiele hinaus gibt es weitere Projekte, Startups und Industriekooperationen, die verschiedene Formen der Depolymerisierung testen bzw. implementieren möchten:

- Matterr by RITTEC mit der revolTEX®-Technologie (Hydrolyse von Polyester; Sitz: Deutschland)
- Eeden (Depolymerisierung von Polyester-Baumwoll-Mischgeweben, genauer Prozess unbekannt; Sitz: Deutschland)
- DePoly (Hydrolyse von Polyester; Sitz: Schweiz),
- GR3N (mikrowellenunterstützte Hydrolyse von Polyester; Sitz: Schweiz),
- Ioniqa (Glykolyse von Polyester; Sitz: Niederlande),
- LOOP Industries (Depolymerisierung von Polyester, genauer Prozess unbekannt, Sitz: Canada; EU-Standort: Frankreich (geplant)),
- KRICT (Niedrigtemperatur-Glykolyse von Polyester; Sitz: Südkorea),
- Northwestern (Katalytische Depolymerisierung ohne Lösungsmittel von Polyamid; Sitz USA), und
- Asahi Kasei (mikrowellenunterstützte Depolymerisierung von Polyamid; Sitz: Japan).

4 Herausforderungen und Lösungsansätze

Insbesondere für die Etablierung des F2F-, also Closed-loop-Recyclings bestehen momentan noch einige Herausforderungen und Grenzen, die sich grob in drei Cluster unterteilen lassen (Öko-Institut e.V. et al. im Erscheinen; Huygens et al. 2023; Wagner et al. 2022; EEA 2022):

Inputseitige Herausforderungen

- Vorsortierung für Recycler durch Heterogenität der Alttextilien erschwert
- Automatische Sortiertechnologien technisch noch nicht ausgereift genug
- Bisher hauptsächlich manuelle Sortierung --> hoher zeitlicher Aufwand --> Verlagerung in Länder mit geringeren Lohnkosten
- Nachverfolgbarkeit der Materialzusammensetzung noch nicht gewährleistet, denn z.B. nur 59 % der Faserkennzeichnungen auf Kleidungsetiketten korrekt (Wilting und van Duijn 2020)

Herausforderungen auf Recyclingebene bzw. bei der Verwendung von Rezyklat

- Beeinträchtigung des Recyclingprozesses durch große Variabilität an chemischen Ausrüstungen, Farbstoffen oder Beschichtungen sowie Materialmischungen

- Rezyklate aus mechanischem Recycling können nicht REACH¹⁵-konforme, bedenkliche Stoffe enthalten (durch Recycling von alten Textilien oder Billigimporten von Unternehmen wie Shein). Schadstoffgehalt kann durch Mischung mit unbedenklichen Textilien reguliert werden (Verdünnungseffekt)
- Bisher nur mechanisches Recycling auf industrieller Ebene verfügbar, F2F-Recycling hat hieran aber nur einen kleinen Anteil
- Verkürzung der Faserlänge durch mechanisches Recycling → Zielkonflikt zwischen höherem Rezyklatgehalt und Haltbarkeit, zumeist Mischung mit Frischfasern nötig

Systematische Herausforderungen

- Bisher keine ökonomischen oder regulatorischen Anreize für den Einsatz von Rezyklaten
- Neuware ist in der Regel billiger als das rezyklierte Gegenstück
- Schwankendes Angebot von und Nachfrage nach F2F-Recycling, Großteil des verfügbaren rezyklierten Polyesters stammt aus PET-Getränkeflaschen
- Regulatorische Hemmnisse beim grenzüberschreitenden Transport von Alttextilien zu Sortier- oder Recyclingunternehmen außerhalb der EU (siehe auch Kapitel 6)
- Mangelnde effiziente Vernetzung von Sortierern, Recyclern und Garnproduzenten --> nötig für eine Kostenreduktion durch Skaleneffekte (Economy of Scale)
- Ökonomisches Operieren der Sortierung bei sinkender Qualität und steigendem peer-to-peer / online Second-Hand-Markt schwierig

Lösungsansätze

Angesichts eines zu erwartenden Anstiegs der zur Verfügung stehenden Alttextilien infolge der Getrennterfassungspflicht ab 2025 (Kapitel 3.1), Anpassungen der Abfallrahmenrichtlinie, Neufassungen der Ökodesign-Verordnung (ESPR), der Abfallverbringungsverordnung und weiterer regulatorischer Anpassungen (mehr dazu in Kapitel 6), werden zurzeit viele Lösungsansätze für die Herausforderungen im Textilrecycling erarbeitet. Technische Entwicklungen, neben den oben genannten Beispielen für Recycling-Projekte und Start-ups, umfassen:

- Verbesserung der automatischen Sortierung (erste vollautomatische Textilsortieranlage im Projekt [SIPTex](#); [Fibersort Project](#))
- Qualitätsverbesserungen beim mechanischen Recycling durch Feinjustierung der Anlagen sowie eine vermehrte Nutzung der rezyklierten Fasern aus dem mechanischen Recycling durch eine Weiterentwicklung von Spinnverfahren (z. B. Spinnverfahren für [recot2](#) durch Gebrüder Otto Dientheim GmbH & Co. KG)
- Forschung zur Verbesserung der Nachverfolgbarkeit (z. B. [Inditex](#) mittels der RFID-Technologie, intelligentes Etikett im [Verbundprojekt DiTex](#), [circularity.id®](#))

¹⁵ REACH ist das Kernstück der europäischen Chemikaliengesetzgebung.

- Entwicklungen in der Auftrennung von Alttextilien und dem Entfernen von Störstoffen wie Reißverschlüssen oder Gummibändern als Vorbereitung für das weitere Recycling ([Wear2®](#) und [Resortecs](#))
- Kooperationen und Kombinationen zwischen verschiedenen Recyclingtechnologien (z. B. Weiterverwendung von Stäuben aus dem mechanischen Recycling)

Außerdem laufen und starten eine Vielzahl an Projekten für eine Stärkung der Kreislaufwirtschaft bei Textilien, beispielsweise zur Stärkung von zirkulären Geschäftsmodellen, Verbraucher*innen-Aufklärung, öffentliche Beschaffung usw., die hier aufgrund des Fokus auf Textilrecycling nicht näher beschrieben werden.

5 Bewertung

Ökologische Bewertung der Verwertungswege

Den größten ökologischen Einfluss hat grundsätzlich die Vermeidung des Konsums und damit der Produktion eines Textils aus frischen oder rezyklierten Fasern (u.a. Prakash et al. 2023a). Der hohe Pro-Kopf-Verbrauch und der Anteil an nicht genutzter Bekleidung im Kleiderschrank zeigen das große Potenzial zur Umweltentlastung durch eine Änderung des Konsumverhaltens (Wagner et al. 2022).

Während die Wiederverwendung von Textilien bezüglich aller Umweltauswirkungen eine positive Bilanz gegenüber dem Recycling aufzeigt, ist beim Vergleich der Recyclingoptionen und der thermischen Verwertung eine pauschale Aussage nicht trivial. Wie die Abfallhierarchie nahelegt, schneidet eine mechanische Verwertung grundsätzlich besser ab als eine Deponierung (außerhalb Deutschlands) und hat in den allermeisten Fällen auch eine bessere Ökobilanz als die thermische Verwertung. Betrachtet man beispielsweise das auf Depolymerisierung basierende Recycling von Polyester-Baumwolle-Mischungen, schneidet im Vergleich dazu die energetische Verwertung in einigen Umweltauswirkungen (z. B. beim Ressourcenverbrauch und beim Wasserverbrauch) besser ab, was auf die hohe Energieintensität des Recyclingprozesses bei gleichzeitig relativ geringem Ertrag bei bestimmten Fasermischungen des Input-Materials zurückzuführen ist (Huygens et al. 2023). Dies ist allerdings keine abschließende Bewertung, denn im werkstofflichen Textilrecycling gibt es zurzeit viele technologische Entwicklungen und Innovationen, welche häufig erst im Labor- oder Pilotstatus sind (vgl. Kap. 3.2.2). Daher fehlt es noch an öffentlich zugänglichen Ökobilanzen für eine umfassende Beurteilung der Umweltauswirkungen, welche sich durch Innovation aber auch durch reine Skalierung der Prozesse ändern können.

Zudem wären – unter der Voraussetzung der Verfügbarkeit der Daten – die Depolymerisierung und die Gewinnung der primären Rohstoffe aus ökologischer Perspektive zu vergleichen: Denn die Gewinnung der beiden Hauptfasertypen – Polyester und Baumwolle – hat ihrerseits Auswirkungen auf Biodiversität, Klima, Wasserverbrauch und -verschmutzung aufgrund des Chemikalieneinsatzes etc.. Der langfristige Ausstieg aus fossilen Rohstoffen im Zuge der Klimaneutralität und der Umstellung auf umweltschonendere Verfahren in Baumwollanbaugebieten könnten dazu führen, dass Rohstoffe womöglich nicht mehr in dem Ausmaß zur Verfügung stehen wie heute (oder erheblich teurer werden), während die Textilbranche wächst.

Es ist sicher, dass aufgrund des höheren Energieeinsatzes bei rohstofflichen Recyclingprozessen (z.T. Temperaturen von über 1000 °C) diese in ihrer Umweltbilanz schlechter abschneiden als die

werkstofflichen Recyclingverfahren. Insbesondere für die Gasification von Textilabfällen stehen allerdings keine belastbaren ökobilanziellen Daten zur Verfügung. Ein weiterer unerwünschter Nebeneffekt: Obwohl das rohstoffliche Recycling gegenüber Verunreinigungen toleranter zu sein scheint als das mechanische Recycling und Depolymerisierung, funktionieren die Verfahren ebenfalls am besten mit relativ reinen Inputströmen. Da diese häufig auch werkstofflich recycelt werden können, besteht ein gewisser Wettbewerb um diese Einsatzstoffe. Es hängt stark von den rechtlichen Rahmenbedingungen ab, ob das rohstoffliche Recycling präferierte Wege der Ressourcenverwertung (insbesondere das werkstoffliche Recycling) untergräbt.

Potenzial

In einer Fashion for Good-Studie wurden in sechs Ländern (Großbritannien, Niederlande, Belgien, Spanien, Polen und Deutschland) Alttextilien hinsichtlich ihrer potenziellen Eignung für das F2F-Recycling untersucht¹⁶. Allerdings wurde nicht untersucht, ob das Sortieren der Alttextilien sowie das Entfernen von Störstoffen aus ökonomischer Sicht rentabel ist bzw. angesichts der steigenden Sammelmengen, die voraussichtlich einen geringeren Anteil an wiederverwendbaren Textilien haben, rentabel bleiben wird. Hiervon hängt jedoch ab, ob diese Alttextilien tatsächlich als Input für die Recycler zur Verfügung stehen.

Dennoch zeigt dieser Vergleich der aktuellen und der potenziell möglichen Verwertungswegen dieser Alttextilien (Abbildung 5-1), dass das Potenzial für das F2F -Recycling bei Weitem noch nicht ausgeschöpft ist (van Duijn et al. 2022).

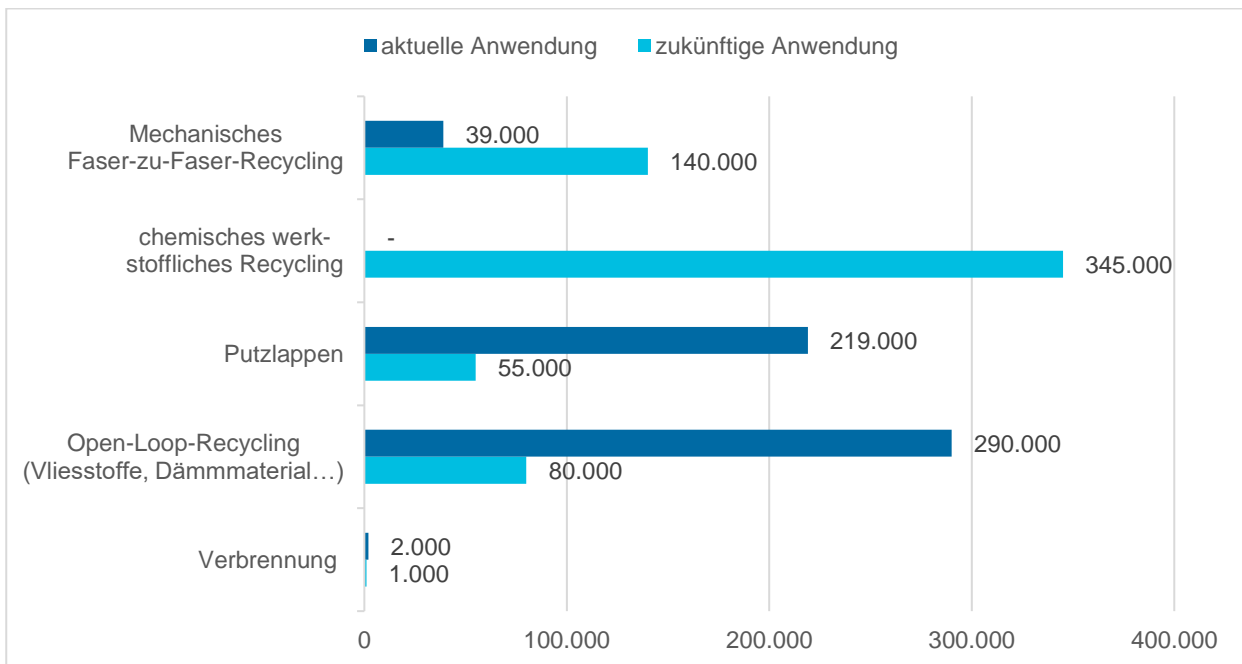
Gemäß der Gemeinschaft für textile Zukunft könnte durch die Getrenntfassungspflicht ab 2025 die gesammelte Menge an Alttextilien (siehe Kapitel 3.2) in der EU in einem Maße gesteigert werden, dass die Recyclingkapazitäten um ca. 1,3 Mio. t ausgebaut werden müssten (Bünemann und Kösegi 2019). Huygens et al. (2023) gehen von einer Steigerung der gesamten Recyclingkapazität für die EU (sowohl Open-loop- als auch Closed-loop-Recycling) von durchschnittlich 4,25 % pro Jahr aus, wobei Huygens et al. einige Marktanalysen mit sehr unterschiedlichen Einschätzungen zur Steigerung der Recyclingkapazitäten in Europa zusammentragen. Darunter ist auch die sehr optimistische Prognose von McKinsey, die basierend auf Interviews mit Technologieentwicklern prognostiziert, dass bis zu 70 % der textilen Abfälle, die für das Recycling in der EU zur Verfügung stehen (Sammelmenge abzüglich der wiederverwendbaren Menge), bis 2030 für eine erneute Anwendung im Bekleidungssektor aus technischer Sicht recycelt werden können (McKinsey & Company 14.07.2022).

Unabhängig von genauen Zahlen lässt sich heute sagen, dass die verfügbaren Recyclingkapazitäten für Closed-Loop-Recycling nicht ausreichen. In Anbetracht dessen und des immer vorhandenen Anteils an nicht für das F2F-Recycling geeigneten Alttextilien bzw. Recyclingoutputs behalten auch

¹⁶ Es wurden folgende Kriterien zur Bewertung der Eignung für das Faser-zu-Faser-Recycling zu Grunde gelegt: Für das mechanische Recycling: Monomaterialien aus Baumwolle, Wolle, Acrylfasern oder Fasermischungen mit hohem Baumwoll- oder Wollanteil (>80 %); keine oder entfernbare Störstoffe (z. B. Reißverschlüsse); nur Monofarben; Für die Depolymerisierung (chemisch-werkstoffliches Recycling): 100 % Polyester, Polyester-Baumwolle-Gemische, Polyestergemische mit mehr als 40 % Polyester, 100 % Baumwolle / 100 % Viskose (die nicht für das mechanische Recycling geeignet sind); keine Einschränkungen bzgl. Farbe oder Störstoffen. Falls Alttextilien mit nicht entfernbaren Störstoffen nicht von den chemischen Recyclern als Input genutzt werden können (aus technischen oder ökonomischen Gründen), würden nur 19 % des errechneten potenziellen Inputs für das chemische Faser-zu-Faser-Recycling zur Verfügung stehen.

die Verwertungswege für andere Sektoren (Open-loop-Recycling) ihre Relevanz und ökologische Sinnhaftigkeit.

Abbildung 5-1: Aktuelle und zukünftige Verwertungswege von Alttextilien in t/Jahr



Quelle: Eigene Darstellung, Daten aus van Duijn et al. (2022)

Hinweis: Die Daten stammen aus Vor-Ort-Untersuchungen in Sortieranlagen in 6 Ländern (Großbritannien, Niederlande, Belgien, Spanien, Polen und Deutschland). Es wurden 21,8 t Alttextilien auf ihre potenzielle Eignung für verschiedene Recyclingwege untersucht. Hierbei wurde ausschließlich der nicht oder nur geringwertig wiederverwendbare Anteil an Bekleidung und Heimtextilien betrachtet; Schuhe, hochwertig wiederverwendbare Bekleidung und Abfallanteile der Sammelmengen wurden nicht betrachtet. Für die Ermittlung der potenziellen zukünftigen Anwendung wurden diese Ergebnisse basierend auf den in diesen Ländern vorhandenen Sammelmengen und dem voraussichtlichen Marktwert (basierend auf Literaturdaten) hochgerechnet.

6 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Der Schwerpunkt dieses Berichts liegt auf dem Sammeln, Sortieren und Recycling von Alttextilien. Deshalb wird hier der gesetzliche Rahmen sowie laufende regulatorische Entwicklungen nur für die Verwertung sowie die damit zusammenhängenden Aspekte des Ökodesigns, also Design-for-Recycling und Rezyklateinsatzquoten dargelegt. Es gibt darüber hinaus viele weitere regulatorische Prozesse mit Bezug zu Textilien, z. B. die Revision der Textilkennzeichnungsverordnung, die Erarbeitung einer Green Claims Directive¹⁷ und die EU Taxonomy, um nur einige zu nennen.

Welche gesetzlichen Regelungen ein aussortiertes Kleidungsstück betreffen, hängt davon ab, ob es weiterhin als Textil oder als Abfall gilt. Alle Alttextilien, die z. B. auf Flohmärkten angeboten, privat weiter- oder direkt in Second-Hand-Läden abgegeben werden, sind kein Abfall. Textilien, bei denen es keine Garantie einer unmittelbaren Weiterverwendung gibt, werden grundsätzlich zunächst als Abfall eingeordnet, insbesondere bei der Abgabe in Altkleidercontainern, was häufig unbekannt ist. Nach der sogenannten „Vorbereitung zur Wiederverwendung“ kann ein Alttextil seinen Abfallstatus auch wieder verlieren. Zur Differenzierung zwischen Textilien für die Wiederverwendung und

¹⁷ Richtlinie über die Begründung ausdrücklicher Umweltaussagen und die diesbezügliche Kommunikation

Textilabfällen entwickelt das Joint Research Center der EU-Kommission in einem Vorhaben, das 2023 begann, sogenannte „End-of-Waste“-Kriterien (JRC 2022).

EU-Abfallrahmenrichtlinie und Kreislaufwirtschaftsgesetz

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) setzt die europäische Abfallrahmenrichtlinie, die Richtlinie 2008/98/EG (EU 2008), für Deutschland um. Ab 2025 gilt EU-weit eine **Getrenntsammlungspflicht** von Alttextilien. Sie gilt für alle in privaten Haushalten anfallenden Alttextilien. Die Getrenntsammlungspflicht von Alttextilien aus anderen Herkunftsbereichen wird über die Gewerbeabfallverordnung geregelt (Bünemann et al. 2023).

Aktuell steht eine **Überarbeitung der Abfallrahmenrichtlinie mit Fokus auf Textilien** (und Lebensmittelabfällen) an: In Bezug auf Textilien schlägt die EU-Kommission Änderungen an Artikeln, die eine erweiterte Herstellerverantwortung (Extended Producer Responsibility, EPR) für Textilien (Art. 22a-d) und Berichtspflichten (Art. 37) regeln, vor (Europäische Kommission 2023). Systeme der erweiterten Herstellerverantwortung sind ein Instrument, um Hersteller und Inverkehrbringer finanziell und organisatorisch für Sammlung und sachgerechte Verwertung von gebrauchten und defekten Textilien verantwortlich zu machen. Dieses Instrument wird empfohlen, da es sich erstens gegen die ökonomischen Ursachen der Umweltprobleme im Textilsektor (Externalisierung von Umweltkosten) richtet und zweitens Summen zusammenbringt, die für die Förderung der o.g. technischen Entwicklungen notwendig sind. Bei In-Kraft-Treten der o.g. Abfallrahmenrichtlinie werden die EU-Mitgliedsstaaten entsprechende Systeme einführen müssen, wobei die genaue Ausgestaltung noch aussteht.

In seiner ersten Lesung zum Vorschlag der Kommission hat das EU-Parlament entschieden, einen größeren Geltungsrahmen für ein EPR-System anzustreben: Zusätzlich zu Kleidung sollten nach Auffassung des Europaparlaments Decken, Bettwäsche, Vorhänge, Hüte, Schuhe, Matratzen und Teppiche, insofern sie jeweils zum größten Teil aus Textilien bestehen, einschließlich Erzeugnissen, die textilähnliche Materialien wie Leder, Kunstleder, Gummi oder Kunststoff enthalten, in den Anwendungsbereich fallen. Außerdem sollten nach Einschätzung des EU-Parlaments Mitgliedsstaaten innerhalb von 18 Monaten Systeme der erweiterten Herstellerverantwortung implementieren statt innerhalb von 30 Monaten, wie es die EU-Kommission vorgeschlagen hatte (Europäisches Parlament 13.03.2024). Der Ministerrat (Council of the European Union 2024) legt hingegen unter anderem Wert auf Sozialunternehmen, z.B. durch die Befreiung von Berichtspflichten, wenn sie keine Textilien für die Wiederverwendung exportieren, will Möglichkeiten einer Ökomodulation gegen die Überproduktion von Textilien erlauben und strebt an, dass getrennt gesammelte Textilien, die nicht durch einen professionellen Sortierungsprozess gehen, als Abfall gelten (und nach der EU-Abfallverbringungsverordnung dann nicht exportiert werden dürfen). Die Verhandlung zwischen Kommission, Rat und Parlament (Trilog) werden frühestens im Herbst 2024, ggf. später, wieder aufgenommen.

Mit der Getrenntsammlungspflicht und der Einführung eines EPR-Systems steigt die Bedeutung der Sortierbetriebe: Voraussichtlich wird wie bereits im Bericht angesprochen die Sammelmenge steigen und es gibt eine Finanzierungsquelle für die Weiterentwicklung und Skalierung der Sortierung. Die Skalierung der Sortierung auf Basis der Faserzusammensetzung von Textilien ist eine zentrale Schlüsselstelle für die Weiterentwicklung der werkstofflichen Recyclingverfahren, insb. Depolymerisierung. Denn – wie oben erwähnt – müssen die Inputs in diese Prozesse sehr spezifisch sein.

Empfehlungen für ein EPR-System für Textilien in Deutschland (Prakash et al. 2023b; Changing Markets Foundation 2022):

- Die Wirkung des EPR hängt ganz zentral von seiner Ausgestaltung ab. Dies betrifft u.a. die Gebührenstruktur, klare Definitionen und Verantwortlichkeiten und den Zweck der Ausgaben der gesammelten Gebühren.
- Positiven Einfluss auf Produktdesign und Langlebigkeit, sowie die Qualität des Recyclings hat ein EPR dann, wenn dies bei der Konzeptionierung mitgedacht und ein explizites Ziel ist: Ein ehrgeiziger Weg könnten Wiederverwendungsquoten und ökologisch modulierte Gebühren für Langlebigkeit sein. Auch das Design für das Recycling könnte in die Gebührenstaffelung integriert werden.
- EPR-Systeme sollten keine Spielräume für Trittbrettfahrer (z. B. im Onlinehandel) lassen und das Monitoring der Mengenströme sowie der Zielerreichung robust, zuverlässig und unabhängig sein.

Vorschläge für ein EPR in Deutschland wurden von Bünemann et al. (2023) vorgelegt. Die konkrete Ausgestaltung ist aktuell eine laufende Diskussion in Deutschland.

EU-Abfallverbringungsverordnung

Sowohl bei Textil-Neuware als auch bei Alttextilien handelt es sich um globale Stoff- und Produktströme. Im Rahmen der EU-Textilstrategie (Europäische Kommission 2022) hat die EU-Kommission zu den oben genannten Maßnahmen **die Weiterentwicklung der Abfallverbringungsverordnung** vorgeschlagen, welche ab Mai 2027 eine Ausfuhr von Textilabfällen in Nicht-OECD-Länder beschränkt bzw. verbietet, wenn diese nicht nachweisen können, dass sie die empfangenen Alttextilien entsprechend der Abfallhierarchie behandeln können. Die grenzüberschreitende Verbringung von Abfällen wird neben der EU-Abfallverbringungsverordnung insbesondere über die internationale **Basler Konvention** geregelt. Kürzlich haben die Regierungen Dänemarks, Frankreichs und Schwedens die Europäische Kommission aufgefordert, einen Vorschlag zu erarbeiten, um im Rahmen des Basler Übereinkommens Textilabfälle strengeren Kontrollmechanismen zu unterwerfen. Sie wollen damit vermutlich erwirken, dass Textilabfälle einer sachgerechteren Abfallbewirtschaftung zugeführt werden. Es ist unklar, welche Auswirkungen das auf Exporteure von Second-Hand-Ware hätte. Vor dem Hintergrund des Verbots der Ausfuhr von Textilabfällen in Nicht-OECD-Länder und der Diskussionen im Rahmen der Basler Konvention ist die Entwicklung der bereits erwähnten End-of-Waste-Kriterien durch das JRC (siehe oben) sehr relevant.

Es stellt sich die Frage, wo global Recyclingkapazitäten, aber auch die Spinnkapazitäten für recyceltes Garn aufgebaut werden. Offen ist bislang auch, ob und wie globale Stoff- und Produktströme in der erweiterten Herstellerverantwortung berücksichtigt werden können. Konkret ist zu klären, ob und wie Gebühren, die über die erweiterte Herstellerverantwortung eingenommen werden, für Sortier- und Recyclingaktivitäten in europäischen und außereuropäischen Ländern zur Verfügung gestellt werden sollen.

EU-Ökodesign-Verordnung¹⁸ (Ecodesign for Sustainable Products Regulation, ESPR)

Die EU-Textilstrategie hat die Erarbeitung von verbindlichen Ökodesign-Anforderungen an Textilien, die Bekämpfung der Vernichtung unverkaufter Ware und einen digitalen Produktpass angekündigt. Die EU-Institutionen haben sich auf die ESPR als Rahmengesetz geeinigt, das nachhaltige Produkte zur Norm machen soll und den Erlass delegierter Rechtsakte für produktspezifische Maßnahmen bestimmt. Die Entwicklung von möglichen Anforderungen an Textilien ist im Rahmen einer „Preparatory Study“ durch das JRC bereits im Gange. Auf diese nach standardisierter Methodik durchgeführte Studie folgt zunächst der Vorschlag der EU-Kommission und später die verbindliche Festlegung von Mindestkriterien.

Ein Delegierter Rechtsakt für Textilien im Rahmen der ESPR wird voraussichtlich für folgende Produktaspekte verbindliche Anforderungen festlegen:

- Haltbarkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit
- Wiederverwendbarkeit
- Reparierbarkeit
- Rezyklatanteil
- F2F-Recyclingfähigkeit
- Umweltauswirkungen und sonstiger Ressourcenverbrauch
- Vorhandensein besorgniserregender Stoffe

Aufgrund des Fokus dieser Studie werden die Produktaspekte F2F-Recyclingfähigkeit und Rezyklatanteil im Folgenden näher erläutert.

Design for Recycling

Die Recyclingfähigkeit eines Produktes wird maßgeblich vom Design, Produktaufbau und dessen Zusammensetzung bestimmt (Duhoux et al. 2022). Wenngleich noch keine einheitlichen Design-Kriterien bestehen, existiert bereits eine Vielzahl an Guidelines mit Design-Ansätzen, die sich positiv auf die Recyclingfähigkeit auswirken. Als Beispiel sind folgende Kriterien zu nennen (Duhoux et al. 2022; Maes et al. 2021):

- Sortenreinheit / Monomaterialität auf Faserebene,
- Geringe Materialvielfalt auf Produktebene, z. B. können für eine Jacke aus Nylon (Polyamid) auch Reißverschlüsse und Knöpfe aus Polyamid verwendet werden,
- Einfache Trennbarkeit unterschiedlicher Materialien oder Produktelemente, d.h. wo bei Produkten mit Schichtstrukturen, z. B. Jacken mit Membran, oder Kleidungsstücken mit Zipperrn, Knöpfen usw. kein einheitliches Material verwendet werden kann, sollten Komponenten trennbar sein,
- Materialkennzeichnung / digitaler Produktpass und
- Begrenzung von Störstoffen.

Welche Materialien oder Chemikalien als Störstoffe gewertet werden, variiert je nach Recyclingverfahren. Für das mechanische Recycling ist insbesondere das Vorhandensein von Beschichtungen

¹⁸ Der offizielle Titel lautet: „Verordnung zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte“

und ein Anteil von über 10 % Elastan als problematisch bzw. als Ausschlusskriterium für ein F2F - Recycling zu nennen. Die Tabellen in Kapitel 3.2.2 benennen je Verfahren die Einschränkungen bzw. Störstoffe.

Detaillierte Anforderungen an die Recyclingfähigkeit werden in Abhängigkeit der Produktgruppen variieren. Die Einführung von Mindeststandards könnte zu einer Einschränkung der aktuellen Freiheiten im Designprozess führen, beispielsweise durch das (sukzessive) Verbot von bestimmten Störstoffen, die zu rein ästhetischen Zwecken verwendet werden, wie Pailletten oder glitzernde Garne (van de Burgt et al. 2023). Insgesamt ist eine stärkere Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in der Ausbildung von Designer*innen notwendig, um den maßgeblichen Einfluss des Designs auf die spätere Recyclingfähigkeit zu vermitteln.

Da im Designprozess neben der Rezyklierbarkeit weitere Aspekte wie bspw. die Haltbarkeit oder der Tragekomfort berücksichtigt werden müssen, werden nicht alle Textilien so designt werden können, dass sie für das F2F-Recycling in Frage kommen.

Rezyklatanforderungen

Um den momentan fehlenden Anreizen für die Verwendung von Rezyklaten entgegenzuwirken, wird die Festlegung eines verpflichtenden Rezyklatgehalts im Rahmen von Ökodesign-Kriterien für Textilien diskutiert. Welcher Rezyklatanteil realistischerweise gefordert werden kann, variiert je nach Faser, Funktion des Endprodukts und Recyclingverfahren. Auch stellt sich die Frage, ob die Anforderungen nach der Verwendung von Alttextilien (post-consumer-waste) oder Industrieabfällen (pre-consumer und post-industrial-waste) unterscheiden sollten. Textile Industrieabfälle haben gegenüber Alttextilien den Vorteil, dass sie sortenreiner erfasst werden können und die Materialzusammensetzungen bekannt sind, was den Recyclingprozess vereinfacht. Weiterhin kann ein erhöhter Rezyklatgehalt zu einer Verringerung der Haltbarkeit der Textilien führen. Dieser Zielkonflikt muss bei der Festlegung von verpflichtenden Rezyklatgehalten berücksichtigt werden.

van de Burgt et al. (2023) hat bereits einen Vorschlag bezüglich der Umsetzung einer Rezyklateeinsatzquote veröffentlicht: Die Autor*innen schlagen eine Unterscheidung zwischen kurzlebiger (< 2 Jahre) und langlebiger (> 2 Jahre) Bekleidung vor.¹⁹ Für die kurzlebige Bekleidung schlagen sie einen Rezyklatgehalt von 5 % pro Produkt ab 2027 mit einer jährlichen Steigerung von 3 % vor. Hierbei darf ausschließlich Rezyklat aus Alttextilien (post-consumer-waste) verwendet werden. Für die langlebigere Bekleidung dürfen auch Rezyklate aus textilen Industrieabfällen verwendet werden; hier wird ebenfalls mit 5 % ab 2027 gestartet und eine jährliche Steigerung von 2 % angestrebt.

Rezyklateeinsatzquoten sind Innovationstreiber und Anreiz für Investitionen in Sammlung, Aufbereitung und Produktdesign im Kontext zirkulärer Geschäftsmodelle. Zentral sind kurzfristig die Finanzierung für die Weiterentwicklung und Skalierung und mittelfristig schnelle Planungs- bzw. Zulassungsverfahren für Recyclinganlagen, ggf. kombiniert mit steuerlichen Anreizen z.B. über Abschreibungsmöglichkeiten. Es sind unter anderem Faktoren wie der zeitliche Vorlauf und Planungssicherheit, die die Verfügbarkeit von (hochwertigem) Rezyklat beeinflussen.

¹⁹ Der Bericht nennt einige Beispiele für kurz- bzw. langlebige Kleidung, z.B. Festival-Outfits für kurzfristig und Uniformen für langfristige Kleidung, aber keine Kriterien.

7 Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es ein großes Potenzial und auch einen großen Bedarf an einer Steigerung der Recyclingkapazitäten und insbesondere der F2F-Recyclingkapazitäten gibt. Hierfür sind auf Seiten der Sortierung technische Entwicklungen nötig, die eine Automatisierung der Sortierung nach Faserzusammensetzungen ermöglichen. Letztendlich bedarf es einer effizienten Sortierung der Alttextilien einerseits entsprechend ihrer Eignung für die Wiederverwendung und eine Sortierung der nicht für die Wiederverwendung geeigneten Alttextilien für die verschiedenen Recyclingverfahren andererseits. Weiter spielt das Design im Hinblick auf Materialvielfalt, Trennbarkeit der Komponenten und die An- bzw. Abwesenheit von Störstoffen eine entscheidende Rolle.

Recyclingtechnologien

Diese Studie zeigt die Fülle an Recyclingtechnologien und Beispielunternehmen, die diese anwenden. Diese sind jedoch – mit Ausnahme des mechanischen Down-Cyclings – überwiegend noch in der Entwicklung. Die niedrige Menge von Rezyklat, die für den Ersatz von Fasern auf Primärrohstoffbasis in Textilien zur Verfügung steht, ist jedoch nicht nur auf die stetige Nachfrage von Abnehmern außerhalb der Textilbranche (Automobil, Dämmstoffe, Putzlappen etc.) zurückzuführen: Beim **mechanischen Recycling** sinkt die Länge der Fasern und nur ein Anteil ist lang genug für den neuen Einsatz in Bekleidung und Heimtextilien.

Mit **Depolymerisierungsverfahren** gewinnt man im Vergleich zum mechanischen Recycling einen größeren Anteil des Materials mit ausreichender Qualität für den Einsatz in Textilien zurück. Außerdem eignet sich das Verfahren zur Auftrennung von Mischgeweben. Ein höherer Energiebedarf und Chemikalieneinsatz sowie hohe Anforderungen an die Reinheit des Inputstroms stehen den Vorteilen gegenüber. D.h. auch diese Verfahren benötigen gut sortierte Alttextilien mit geringer Materialvielfalt. Sie verhindern also nicht die für die Wiederverwendung wichtige Sortierung und ergänzen, wo das mechanische Recycling seine Grenzen hat.

Die Verfahren sind aber noch nicht im industriellen Maßstab etabliert. Dennoch schätzen van Duijn et al. (2022), viele Start-ups (siehe die Beispiele in Kapitel 3.2.3) und die Autor*innen dieser Studie das Potenzial dieser Verfahren enorm hoch ein, denn es ist der Kompromiss aus höheren Aufwänden beim Recycling und guten Output-Qualitäten bei vertretbaren Aufwänden zur Herstellung der recycelten Fasern. Die Weiterentwicklung und Skalierung der Depolymerisierungsverfahren gilt daher als notwendig, um mehr Textilien zu recyceln, entsprechende private und öffentliche Fördersummen sind erforderlich. Ökodesign-Anforderungen über einen verpflichtenden Rezyklateinsatz können bei dieser Entwicklung förderlich wirken, da dadurch ein Absatzmarkt garantiert wird.

Die Alternative, bei der durch Hitzezufuhr die chemische Struktur der Faser in eine Reihe von undefinierten Kohlenwasserstoffen mit kurzer Kettenlänge zerlegt wird, ist das **rohstoffliche Recycling**. Es benötigt mehr Energie als die Depolymerisierung, um aus seinem Output recycelte Fasern und Garne herzustellen. In den überwiegenden Fällen werden heute aus den Pyrolyseölen und Synthesegasen, die gewonnen werden, keine Fasern für den Einsatz in Textilien hergestellt. Das rohstoffliche Recycling ist beispielsweise für kontaminierte Textilabfälle dennoch besser als die thermische Verwertung, bei der der Kohlenstoff aus biologischen und synthetischen Fasern als CO₂ in die Umgebungsluft emittiert wird.

So ergibt sich nach der Sortierung für die Wiederverwendung die Priorisierung von werkstofflichen Recyclingverfahren. Betrachtet man den aktuellen Technologiestand, ist es nicht die eine Faser, die recycelt werden kann und die andere Faser, die nicht recycelt werden kann, sondern

- die Kombination von unterschiedlichen Fasern und Materialien in den Produkten,
- die heutige Sortierung, die die Teile, die nicht für die Wiederverwendung geeignet sind, nicht nach Faserzusammensetzungen weitersortiert bzw. aus ökonomischen und technischen Gründen nicht weiter sortieren kann, und
- die größeren ökonomischen Umstände, wie die Absatzmärkte außerhalb der Textil- und Bekleidungsindustrie, die Kosten für die Weiterentwicklung des F2F-Recyclings und die Preise für Textilien und Bekleidung mit F2F-Rezyklaten.

Regulatorik

Bei der Überarbeitung der Abfallrahmenrichtlinie ist v.a. das EPR-System relevant. Die EU wird in der Richtlinie einige Prinzipien festlegen, danach wird das System in Deutschland ausgestaltet. Um ökonomische Hürden für die Abfallbehandlung zu überwinden, muss das EPR-System finanziell so ausgestattet werden, dass Sammel- und Sortierbetriebe wirtschaftlich arbeiten können. Die Entwicklung hin zu einer Sortierung der nicht mehr für die Wiederverwendung geeigneten Alttextilien nach Faserzusammensetzung muss flächendeckend umgesetzt werden können, auch wenn der Anteil der potenziellen Second-Hand-Textilien in gesammelten Gesamtmengen, z.B. aufgrund von peer-to-peer-exchange im Internet und Verbreitung von zirkulären Geschäftsmodellen, sinkt. Gleichzeitig muss über die EPR-Systeme und aus weiteren Quellen die Entwicklung von Recyclingtechnologien finanziert werden. Hier müssen in den nächsten Jahren die Investitionssicherheit und Weiterentwicklung der Branche gewährleistet werden.

Darüber hinaus sind einige Gesetzesinitiativen bereits verabschiedet, z. B. die Abfallverbringungsverordnung, oder in der Entwicklung, z. B. Ökodesign-Anforderungen für Textilien. Sie sind weitere Bausteine, um die mit Produktion, Konsum und Import von Bekleidung und der Verwertung und dem Export von Altkleidung verbundenen Umweltauswirkungen regulatorisch zu adressieren. Es wird beispielsweise erwartet, dass die Sammelmengen steigen und damit diejenige Menge, die für das F2F-Recycling von Textilien zur Verfügung steht. Eine Rezyklateinsatzquote im Rahmen von Ökodesign-Anforderungen würde den Absatzmarkt für Rezyklat steigern. Zu den vielen laufenden Prozessen sei gesagt:

- Die laufenden Prozesse sind notwendig und auf ihre Ausgestaltung kommt es an.
- Viele aktuell einzeln diskutierte Gesetzesinitiativen stehen in Zusammenhängen. Die Zusammenhänge und Wirkungen von einzelnen Instrumenten aufeinander müssten noch weiter untersucht werden. Beispiele sind:
 - Ökodesign-Anforderungen und die Ökomodulation von EPR-Gebühren
 - Die grenzüberschreitende Verbringung von Textilabfällen, eine Rezyklateinsatzquote im Rahmen von Ökodesign-Anforderungen und die Förderung des Ausbaus von Recyclingkapazitäten etc.
 - Die Textilkennzeichnungsverordnung und der digitale Produktpass im Rahmen von ESPR im Hinblick auf eine Steigerung der Sortierung nach Faserzusammensetzung
- Die Auswirkungen von EU-Gesetzgebungsverfahren und nationalen Entscheidungen, z. B. in Bezug auf EPR, auf die globalen Stoffströme und Nicht-EU-Länder sind weiterhin Gegenstand von Diskussionen und Studien.

In Hinblick auf eine dauerhafte und langfristige Reduzierung der Umweltauswirkungen unserer Textilien ist ein Fokus auf das Recycling und kreislauffähige Produkte jedoch nicht ausreichend. Die Recyclingprozesse, insbesondere die chemischen Recyclingverfahren, haben selbst eine nicht unerhebliche Umweltauswirkung und Ressourceninanspruchnahme durch die Verwendung von chemischen Hilfsstoffen und Energieträgern (Gimkiewicz 2022; Huygens et al. 2023). Deshalb ist zu betonen, dass der größte Einfluss durch eine Reduktion des Konsums erreicht werden kann. Hierfür ist ein Kulturwandel hin zu einer höheren Wertigkeit von Textilien und eine aktive Förderung des suffizienten Kleidungskonsums erforderlich.

Literaturverzeichnis

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hg.) (2024): Entwurf der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie vorgelegt. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/meldung/entwurf-der-nationalen-kreislaufwirtschaftsstrategie-vorgelegt>, zuletzt geprüft am 18.06.2024.
- Bünemann, A.; Bartnik, S.; Löhle, S.; Kösegi, N. (2023): Erarbeitung möglicher Modelle der erweiterten Herstellerverantwortung für Textilien, Produktverantwortungsmodelle für Textilien (Pro-Tex) (146/2023). cyclos GmbH. Umweltbundesamt (Hg.), 2023. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erarbeitung-moeglicher-modelle-der-erweiterten>, zuletzt geprüft am 17.09.2024.
- Bünemann, A.; Kösegi, N. (2019): Erweiterte Produzentenverantwortung für Textilien - Fachtagung der Gemeinschaft für textile Zukunft., Textilrecycling - eine zwingende Herausforderung. Berlin, 27.11.2019. Online verfügbar unter <https://textile-zukunft.de/wp-content/uploads/2014/10/EPR-%C3%BCr-Textilien.pdf>, zuletzt geprüft am 12.06.2024.
- bvse - Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (Hg.) (2020): Bedarf, Konsum, Wiederverwendung und Verwertung von Bekleidung und Textilien in Deutschland, 2020. Online verfügbar unter https://www.bvse.de/dateien2020/1-Bilder/03-Themen_Ereignisse/06-Textil/2020/studie2020/bvse%20Alttextilstudie%202020.pdf, zuletzt geprüft am 17.09.2024.
- Changing Markets Foundation (Hg.) (2022): EU Textile Strategy and the Crucial Role of Extended Producer Responsibility, 2022. Online verfügbar unter <https://changingmarkets.org/report/new-look-for-the-fashion-industry-eu-textile-strategy-crucial-role-extended-producer-responsibility-epr/>, zuletzt geprüft am 21.06.2024.
- Council of the European Union (Hg.) (2024): Position des Rates der Umweltministerinnen und Minister zur Waste Framework Directive, 07.06.2024. Online verfügbar unter <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10820-2024-INIT/en/pdf>, zuletzt geprüft am 23.08.2024.
- Deckers, J.; Duhoux, T.; Due, S. (2024): Textile waste management in Europe's circular economy. European Environment Agency (Hg.), 2024. Online verfügbar unter <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-ce/products/etc-ce-report-2024-5-textile-waste-management-in-europes-circular-economy>, zuletzt geprüft am 18.06.2024.
- Destatis (22.03.2023): Pressemitteilung: Pressemitteilung Nr. N019 vom 22. März 2023. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23_N019_51_32.html, zuletzt geprüft am 13.06.2024.
- Duhoux, T.; Le Blévenec, Kévin; Manshoven, Saskia; Grossi, F.; Arnold, M. (2022): Textiles and the Environment, The role of design in Europe's circular economy. European Environmental Agency (Hg.), 2022. Online verfügbar unter https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-ce/products/etc-ce-products/etc-ce-report-2-2022-textiles-and-the-environment-the-role-of-design-in-europes-circular-economy/@@download/file/ETC_design%20of%20textiles.pdf, zuletzt geprüft am 17.09.2024.
- Duhoux, T.; Maes, E.; Hirschnitz-Garbers, M.; Peeters, K.; Asscherickx, L.; Christis, M.; Stubbe, B.; Colignon, P.; Hinzmann, M.; Sachdeva, A. (2021): Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling, Final Report. European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. Publications Office of the European Union (Hg.). Luxembourg, 2021. Online verfügbar unter <https://data.europa.eu/doi/10.2873/828412>, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

- EEA - European Environment Agency (Hg.) (2022): Investigating Europe's secondary raw material markets (12/2022), 2022. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/investigating-europes-secondary-raw-material>, zuletzt geprüft am 17.09.2024.
- Ellen McArthur Foundation (2017): A New Textiles Economy, Redesigning fashion's future, 2017. Online verfügbar unter <https://ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy>, zuletzt geprüft am 18.06.2024.
- EU (2008): Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj/deu>.
- Europäische Kommission (2022): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN, EU-Strategie für nachhaltige und kreislauffähige Textilien. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0141>, zuletzt geprüft am 19.12.2022.
- Europäische Kommission (Hg.) (2023): Proposal for a targeted revision of the Waste Framework Directive, amending Directive 2008_98_EC on waste. Online verfügbar unter https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-targeted-revision-waste-framework-directive_en, zuletzt geprüft am 17.06.2024.
- Europäisches Parlament (13.03.2024): Pressemitteilung: MEPs call for tougher EU rules to reduce textiles and food waste. Online verfügbar unter <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20240308IPR19011/meps-call-for-tougher-eu-rules-to-reduce-textiles-and-food-waste>, zuletzt geprüft am 17.06.2024.
- European Environment Agency (Hg.) (2023): EU exports of used textiles in Europe's circular economy, 2023. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/eu-exports-of-used-textiles/eu-exports-of-used-textiles>, zuletzt geprüft am 18.06.2024.
- European Environment Agency (Hg.) (2024): Management of used and waste textiles in Europe's circular economy (03/2024), 2024. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/management-of-used-and-waste-textiles/management-of-used-and-waste/download.pdf.static>, zuletzt geprüft am 13.06.2024.
- Gimkiewicz, J. (2022): Die Rolle der Langlebigkeit und der Nutzungsdauer für einen nachhaltigen Umgang mit Bekleidung, Eine Studie zum aktuellen Forschungsstand. Unter Mitarbeit von Dr. Sina Depireux, Dr. Laura Spengler, Brigitte Zietlow (TEXTE, 112). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau, 2022. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-10-19_texte_112-2022_langlebigkeit-bekleidung_bf.pdf, zuletzt geprüft am 27.12.2022.
- Huygens, D.; Foschi, J.; Caro, D.; Patinha, C. C.; Faraca, G.; Foster, G.; Solis, M.; Marschinski, R.; Napolano, L.; Fruergaard, A. T.; Tonini, D. (2023): Techno-scientific assessment of the management options for used and waste textiles in the European Union, 2023. Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC134586>, zuletzt geprüft am 17.09.2024.
- JRC - European Commission Joint Research Centre (Hg.) (2022): Scoping possible further EU-wide end-of-waste and by-product criteria, 2022. Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC128647>, zuletzt geprüft am 17.09.2024.
- Jungmichel, N.; Wick, K.; Nill, M. Dr. (2020): Kleider mit Haken, Fallstudie zur globalen Umweltinanspruchnahme durch die Herstellung unserer Kleidung. Umweltbundesamt (Hg.), 2020. Online

verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_kleider_mit_haken_bf.pdf, zuletzt geprüft am 06.06.2024.

- Maes, E.; Devaere, S.; Colignon, S.; Wynant, J.; Soenen, B.; Dasilva, N.; Duhoux, T.; Dils, E.; Eggermont, B.; Wolde, A. ten; Bouteligier, S. (2021): Ecodesign criteria for consumer textiles. Centexbel; Flanders DC; Fod; Vito; Fedrustria; Ecopreneur; Ovam. Ovam (Hg.), 2021. Online verfügbar unter https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/ecodesign_criteria_for_consumer_textiles.pdf, zuletzt geprüft am 17.09.2024.
- McKinsey & Company (14.07.2022): Scaling textile recycling in Europe—turning waste into value. In: *McKinsey & Company*, 14.07.2022. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/scaling-textile-recycling-in-europe-turning-waste-into-value>, zuletzt geprüft am 17.09.2024.
- Naji, F.; Reinelt, B.; Schönemann, M.; Nordsieck, H.; Kroban, M.; Tronecker, D.; Dietz, W.; Albert, M.; Rommel, W.; Cherdron, B.; Krichel, A.; Schlichter, S. (2023): Ökonomische Potenziale des Textilrecyclings und der Wasserstofferzeugung aus Textilabfällen in Bayern (Nr. 73). Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH. bifa Umweltinstitut GmbH (Hg.), 2023. Online verfügbar unter https://www.bifa.de/fileadmin/_migrated/pics/bifa-Texte/bifa-Text_Nr.73_Oekonomische_Potenziale_des_Textilrecyclings.pdf, zuletzt geprüft am 29.05.2024.
- Öko-Institut e.V.; Hochschule Niederrhein; Hochschule Hof (im Erscheinen): Die neue Ökodesign-Verordnung: Anforderungen an das Ökodesign von Textilien und die mögliche Überführung in ein Ökodesign-Label. Umweltbundesamt (Hg.), im Erscheinen.
- Prakash, S.; Löw, C.; Antony, F.; Dehoust, G.; Stuber-Rousselle, K.; Liu, R.; Castillero, L. G.; Hernandez, V. L.; Hurst, K.; Köhler, A.; Schön-Blume, N.; Loibl, A.; Sievers, L. et al. (2023a): Modell Deutschland Circular Economy, Modellierung und Folgenabschätzung einer Circular Economy in 9 Sektoren in Deutschland. Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI, Freie Universität Berlin, 2023. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/MDCE_Modellierung.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2023.
- Prakash, S.; Löw, C.; Jacob, K.; Fiala, V.; Dehoust, G.; Gascón Castillero, L.; Hurst, K.; Helleckes, H.; Manhart, A. (2023b): Modell Deutschland Circular Economy, Politik-Blueprint. im Auftrag des WWF Deutschland. Öko-Institut e.V. (Hg.), 2023. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/projekte/detail/modell-deutschland-circular-economy-politik-roadmap>, zuletzt geprüft am 21.06.2024.
- Textile Exchange (Hg.) (2022): Preferred Fiber & Materials Market Report, October 2022. Online verfügbar unter https://textileexchange.org/app/uploads/2022/10/Textile-Exchange_PFMR_2022.pdf, zuletzt geprüft am 29.05.2024.
- van de Burgt, M.; van 't Zelfde, J.; Ooms, J.; Tobé, W.; Zandbergen, B.; Kort, M. (2023): Performance requirements for textiles - Input on EU sustainable design criteria for textiles, 2023. Online verfügbar unter <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2023/09/26/bijlage-eindrapport-onderzoek-designeisen-textiel/bijlage-eindrapport-onderzoek-designeisen-textiel.pdf>, zuletzt geprüft am 23.08.2024.
- van Duijn, H.; Papú Carrone, N.; Bakowska, O.; Huang, Q.; Akerboom, M.; Rademan, K.; Vellanki, D. (2022): SORTING FOR CIRCULARITY EUROPE, AN EVALUATION AND COMMERCIAL ASSESSMENT OF TEXTILE WASTE ACROSS EUROPE. Circle Economy; Fashion for Good, 2022. Online verfügbar unter https://refashion.fr/eco-design/sites/default/files/fichiers/Sorting-for-Circularity-Europe_Fashion-for-Good.pdf, zuletzt geprüft am 28.05.2024.
- Wagner, J.; Steinmetzer, S.; Theophil, L.; Strues, A.-S.; Kösegi, N.; Hoyer, S. (2022): Evaluation der Erfassung und Verwertung ausgewählter Abfallströme zur Fortentwicklung der

Kreislaufwirtschaft, Abschlussbericht (31/2022). INTECUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management. Umweltbundesamt (Hg.), 2022. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_31-2022_evaluation_der_erfassung_und_verwertung_ausgewaehlter_abfallstroeme_zur_fortentwicklung_der_kreislaufwirtschaft.pdf, zuletzt geprüft am 22.05.2024.

Wilting, J.; van Duijn, H. (2020): Clothing Labels, Accurate or not?. Circle Economy und Ministry for Infrastructure and Watermanagement (Hg.), 2020. Online verfügbar unter https://cdn.prod.website-files.com/5d26d80e8836af2d12ed1269/5e9feceb7b5b126eb582c1d9_20200420%20-%20Labels%20Check%20-%20report%20EN%20web%20297x210mm.pdf, zuletzt geprüft am 17.06.2024.

Anhänge

Anhang I. Abkürzungsverzeichnis

AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung
Art.	Artikel
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EPR	Extended Producer Responsibility; Erweiterte Herstellerverantwortung
ESPR	Ecodesign for Sustainable Product Regulation (Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte)
EU	Europäische Union
F2F	Faser-zu-Faser-Recycling
e.V.	Eingetragener Verein
H ₂	Wasserstoff
JRC	Joint Research Centre (Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Union)
kg	Kilogramm
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kt	Kilotonne
Mio.	Millionen
NIR	Nahinfrarot-Spektroskopie
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
örE	öffentlich-rechtliche Entsorger
PA6	Polyamid 6
PA6,6	Polyamid 6,6
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
RFID	Radio Frequency Identification
rPA6	rezykliertes Polyamid 6
rPET	rezykliertes Polyethylenterephthalat
t	Tonnen
TRL	Technology Readiness Level (Technologischer Reifegrad)
USD	US-Dollar (United States dollar)

Anhang II. Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabellen

Tabelle 3-1:	Automatische Sortierungsverfahren	11
Tabelle 3-2:	Mechanisches Recycling	16
Tabelle 3-3:	Lösungsmittelbasierte Aufbereitung	18
Tabelle 3-4:	Depolymerisierungsverfahren	20
Tabelle 3-5:	Rohstoffliches Recycling / Gasification	22
Tabelle 3-6:	Stärken und Schwächen der verschiedenen Recyclingtechnologien	23

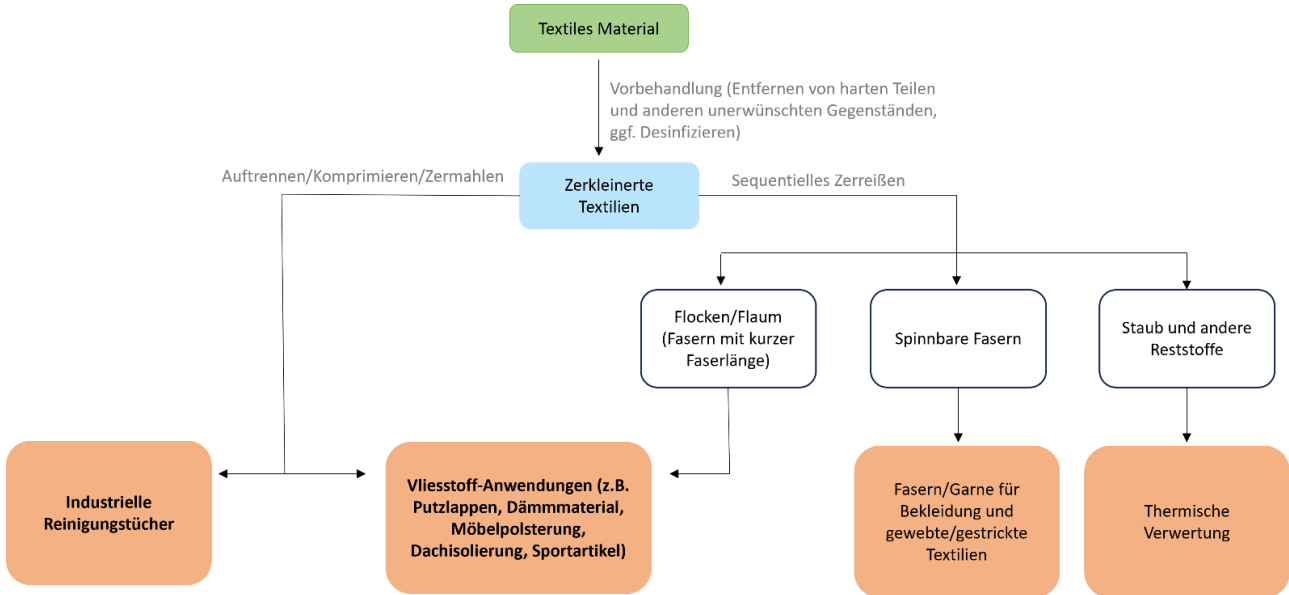
Abbildungen

Abbildung 2-1:	Aufteilung der in Verkehr gebrachten Mengen nach Produktkategorie	6
Abbildung 3-1:	Faserzusammensetzung von getrennt gesammelten Alttextilien in der EU	8
Abbildung 3-2:	Verwertungswege für Alttextilien aus Deutschland	10
Abbildung 3-3:	Schematischer Überblick über Alttextilflüsse in Open- und Closed-loop-Recyclingverfahren	12
Abbildung 3-4:	Anteil von Textilien und Schuhen im Hausmüll	13
Abbildung 3-5:	Klassifizierung der Recyclingtechnologien	15
Abbildung 5-1:	Aktuelle und zukünftige Verwertungswege von Alttextilien in t/Jahr	30
Abbildung 7-1:	Mechanisches Recycling von Alttextilien (a) mit hohem (Baum-)Wollanteil oder (b) ausschließlich aus synthetischen Fasern	44
Abbildung 7-2:	Lösungsmittelbasierte Aufbereitung von Baumwoll-Kunstfaser-Textilien	45
Abbildung 7-3:	Depolymerisierung von Alttextilien aus (a) überwiegend synthetischen Fasern und (b) Fasergemischen (zumeist in Kombination mit anderen Verfahren wie der lösemittelbasierten Aufbereitung)	46
Abbildung 7-4:	Rohstoffliches Recycling	47

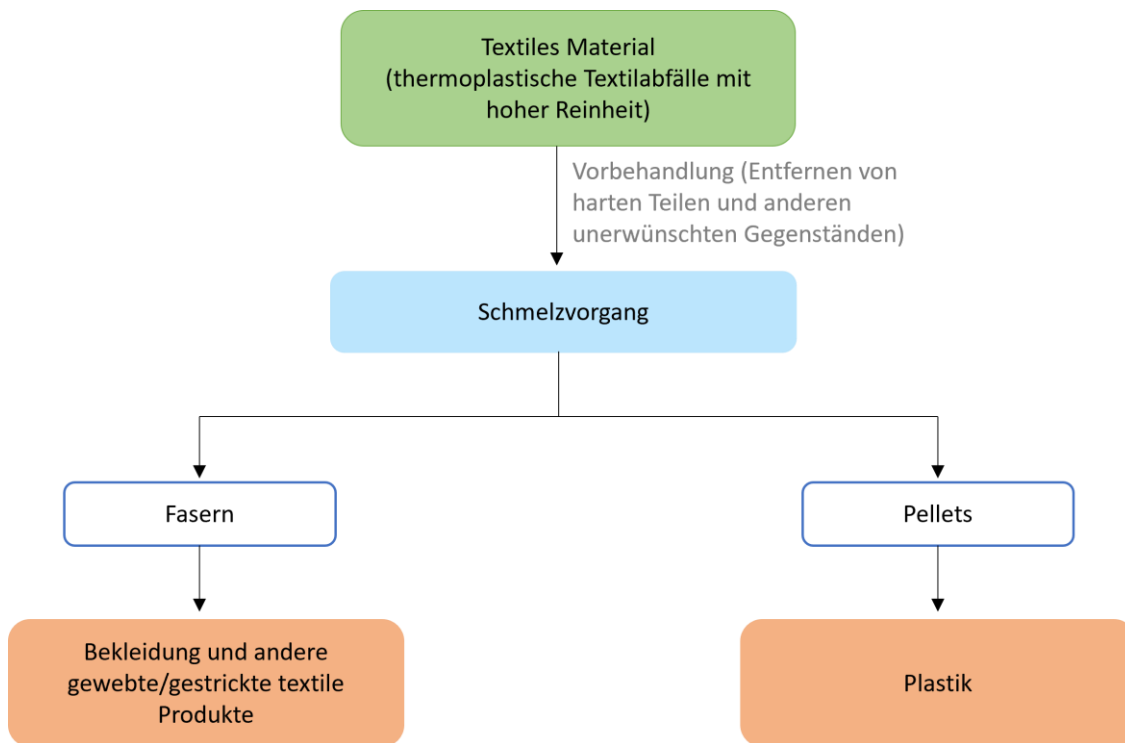
Anhang III. Schematische Darstellungen von Recyclingtechnologien

Abbildung 7-1: Mechanisches Recycling von Alttextilien (a) mit hohem (Baum-)Wollanteil oder (b) ausschließlich aus synthetischen Fasern

a)

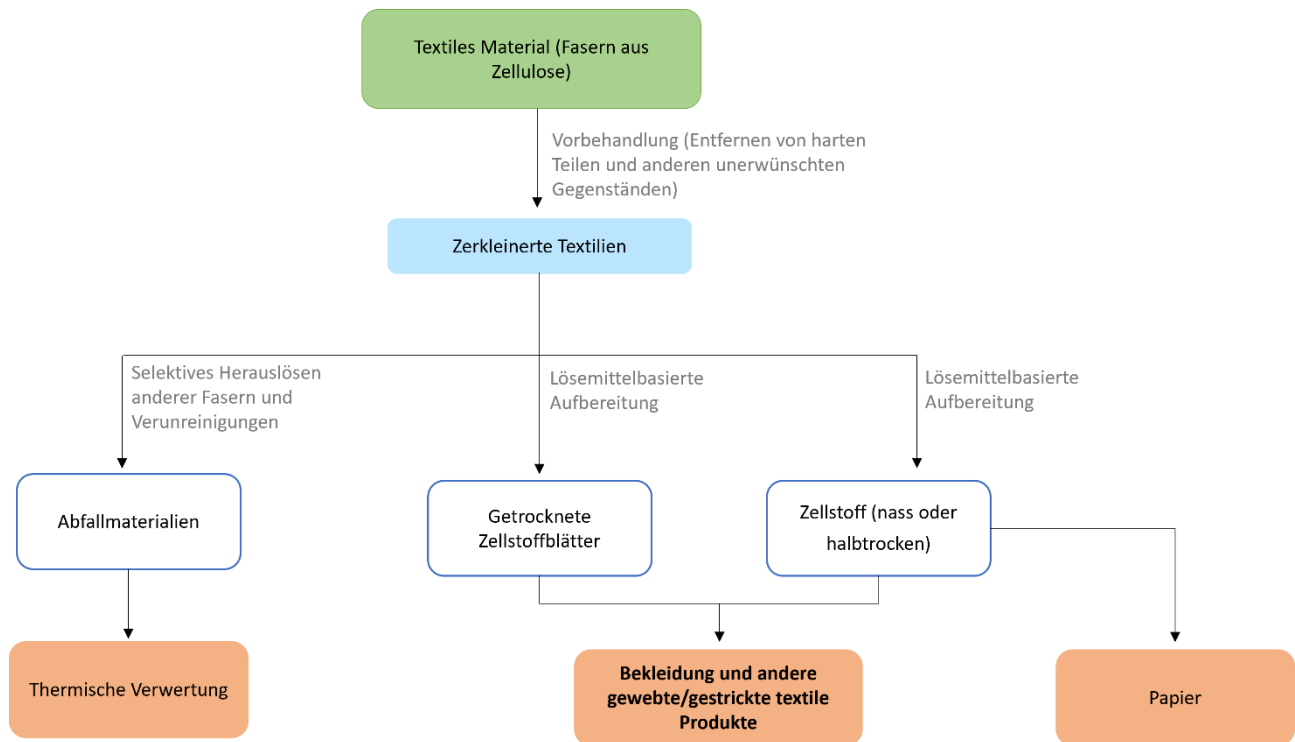


b)



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Huygens et al. (2023) basierend auf Duhoux et al. (2021)

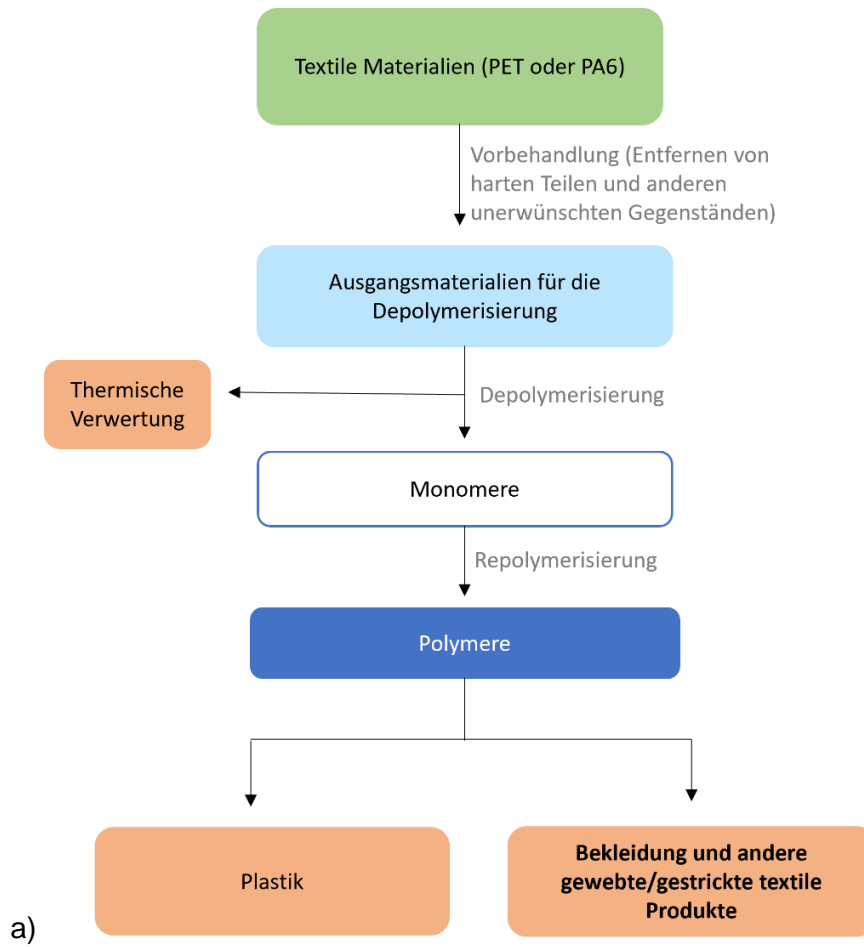
Abbildung 7-2: Lösungsmittelbasierte Aufbereitung von Baumwoll-Kunstfaser-Textilien

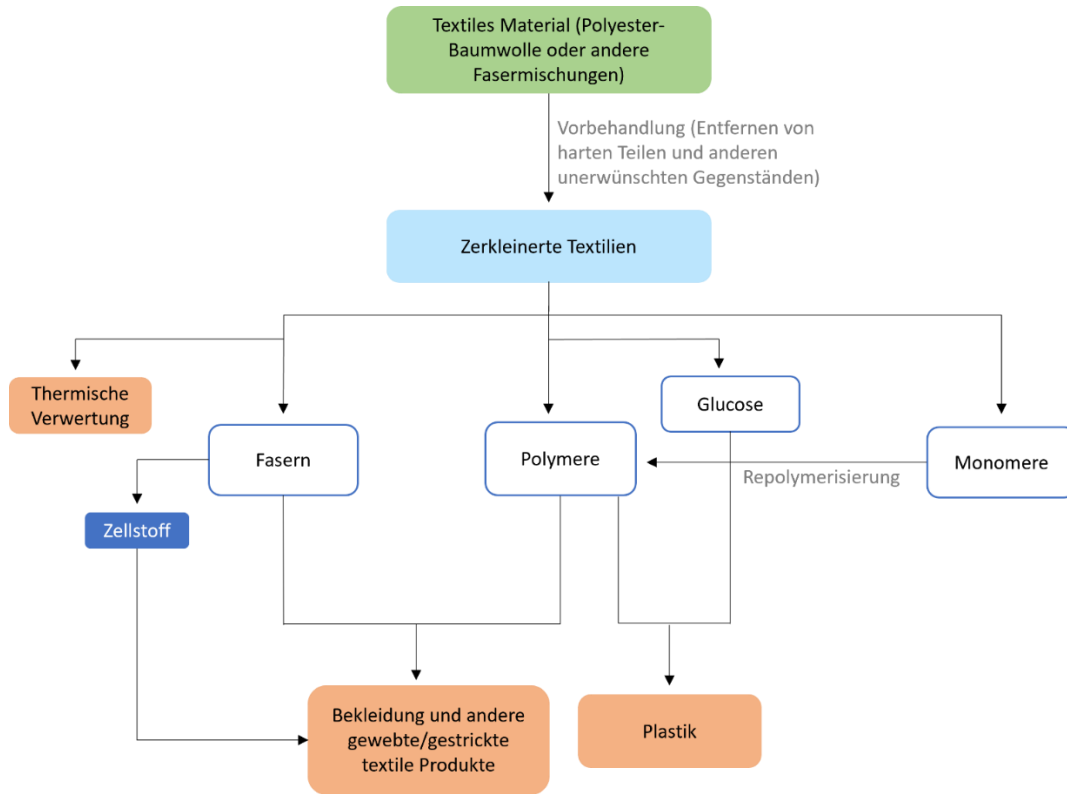


Hinweis: Die Grafik zeigt den in Tabelle 3-3 rechts dargestellten Prozess.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Huygens et al. (2023) basierend auf Duhoux et al. (2021)

Abbildung 7-3: Depolymerisierung von Alttextilien aus (a) überwiegend synthetischen Fasern und (b) Fasergemischen (zumeist in Kombination mit anderen Verfahren wie der lösemittelbasierten Aufbereitung)



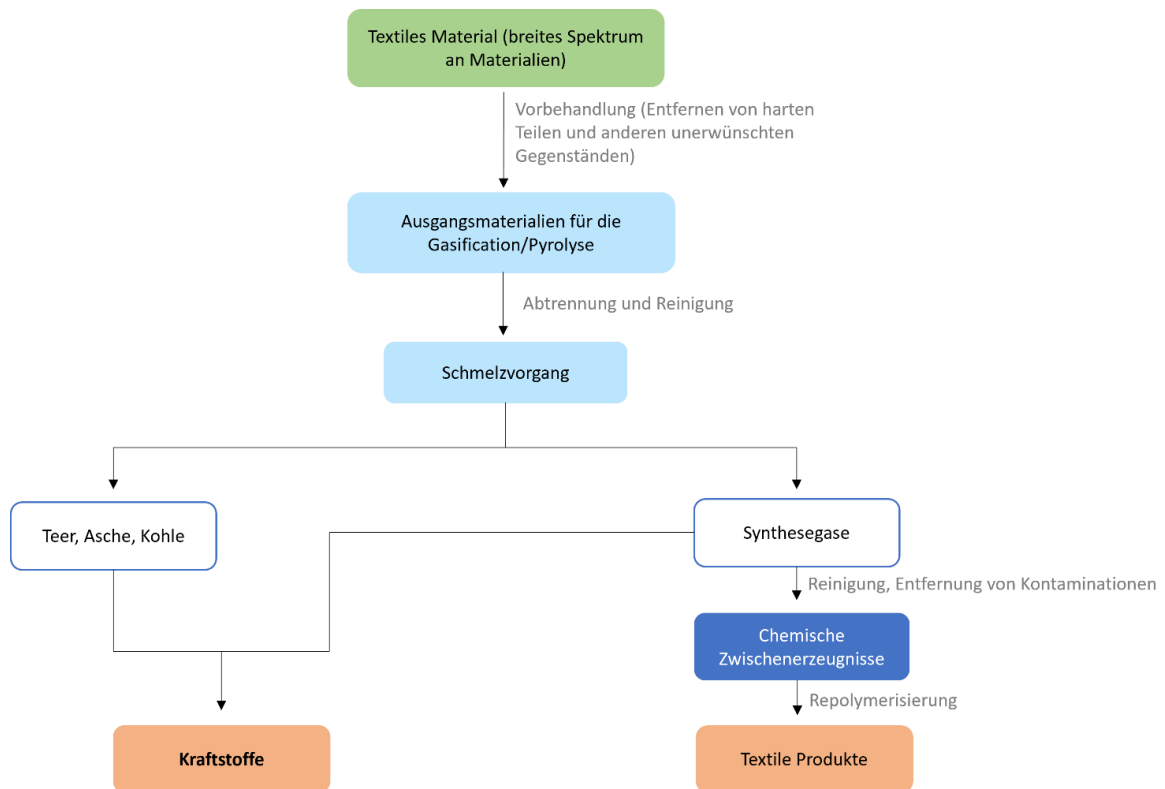


b)

Hinweis: Der Prozess (b) ist noch nicht in industriellem Maßstab verfügbar.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Huygens et al. (2023) basierend auf Duhoux et al. (2021)

Abbildung 7-4: Rohstoffliches Recycling



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Huygens et al. (2023) basierend auf Duhoux et al. (2021)