



GRS PRO
Textil



Stiftung
GRS Batterien

Stand der Technik und Entwicklungsbedarf zu Recycling- und Verwertungs- verfahren für Textilien

Vorwort

Die Europäische Union hat mit dem Green Deal das Thema Textilien als zentrales Handlungsfeld für eine nachhaltige Entwicklung identifiziert – und das aus gutem Grund: Unser Konsum von Kleidung und Heimtextilien ist mit erheblichen ökologischen und sozialen Auswirkungen verbunden, von hohem Ressourcen- und Energieverbrauch bis hin zu wachsendem Abfallaufkommen. Mit der europaweiten Einführung der Erweiterten Herstellerverantwortung (Extended Producer Responsibility/EPR) rücken nun erstmals auch Alttextilien in den Fokus der Politik: Aus textilem Abfall kann ein wertvoller Rohstoff für eine zukünftige Kreislaufwirtschaft werden.

Gleichzeitig zeigt sich: Der Anteil hochwertigen Faser-zu-Faser-Recyclings stagniert seit Jahren im niedrigen einstelligen Bereich. Während mechanisches Recycling dominiert, handelt es sich dabei überwiegend um Downcycling – ein Ansatz, der weit hinter den Ambitionen des EU-Green-Deal zurückbleibt. Um textile Kreisläufe wirksam zu gestalten, nachhaltige Verwertungswege zu stärken und ein tragfähiges EPR-System von Beginn an effektiv aufzubauen, sind fundierte Kenntnisse zu bestehenden Verfahren und Stoffströmen entscheidend. Datenlücken hemmen derzeit jedoch Innovationen, erschweren zielgerichtete Fördermaßnahmen und behindern die Ausgestaltung wirkungsvoller regulatorischer Vorgaben.

Vor diesem Hintergrund hat das Faserinstitut Bremen (FIBRE) im Auftrag der Stiftung GRS und mit Unterstützung der GRS PRO die Studie „Stand der Technik und Entwicklungsbedarf zu Recycling- und Verwertungsverfahren für Textilien“ durchgeführt. Sie untersucht die aktuellen Rahmenbedingungen und Perspektiven des Textilrecyclings, analysiert bestehende Verfahren und zeigt künftige Entwicklungsbedarfe auf. Dabei verbindet sie wissenschaftlich-technische Expertise mit Praxiserfahrungen aus Industrie und Regulierung und richtet besonderes Augenmerk auf die notwendige Vereinheitlichung von Begrifflichkeiten im Bereich Recycling.

Die Ergebnisse zeigen deutlich: Obwohl große Potenziale in alternativen Verfahren wie dem chemischen Recycling bestehen, dominiert nach wie vor mechanisches Recycling in Form von Downcycling. Um diese Entwicklungspotenziale zu erschließen, und die nötigen Infrastrukturen aufzubauen, bedarf es einer gezielten politischen Steuerung, klarer Umweltziele und einer verbindlichen regulatorischen Verankerung. Eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Verwertung liegt dabei nicht nur im öffentlichen Interesse, sondern auch im Interesse der Hersteller, die im Rahmen der EPR künftig für die Organisation und Finanzierung der Textilentsorgung verantwortlich sind. Hochwertiges Recycling ist ein wichtiger Baustein in einer Reihe von textilen Verwertungsmöglichkeiten, die aus der aktuellen Krise des textilen Abfalls hochwertige Rohstoffe gewinnen können.

Lea Kirstein

Projektleitung Textil GRS PRO

Inhalt

Zusammenfassung	4
1 Einleitung	5
2 Literaturrecherche	6
2.1 Struktur der Recherche	6
2.2 Ergebnisse der Literaturrecherche	7
2.2.1 Bibliometrie	7
2.2.2 Wirtschaftsdatenbanken	11
2.2.3 Inhaltliche Auswertung der Literatur	14
3 Interviews	25
3.1 Planung & Struktur	25
3.1.1 Aufbau und Durchführung der Experteninterviews	25
3.1.2 Aufbau und Durchführung der Industrieinterviews	26
3.2 Auswertung der Interviews	26
3.2.1 Experteninterviews	26
3.2.2 Industrieinterviews	35
3.3 Zusammenfassung Interviews	43
3.3.1 Stoffströme und Einklassierung der Teilnehmer	43
3.3.2 Sortierung und Reißerei	44
3.3.3 Technischer Reifegrad und Bedeutung der Verfahren	44
3.3.4 Allgemeine Fragen zum Abschluss	45
4 Zusammenführung und Bewertung der Ergebnisse	46
5 Quellen	50
Impressum	58

Zusammenfassung

Die Studie umfasst eine Literaturrecherche zum Stand der Technik und Entwicklungsbedarf zu Recycling- und Verwertungsverfahren. Begleitet wird die Studie von Befragungen von Experten sowie Vertretern aus Forschung und Industrie. Die Kernergebnisse sind:

- Mechanisches Recycling (i. d. R. Downcycling) dominiert derzeit – und bleibt damit deutlich hinter den Ambitionen des EU-Green-Deal zurück.
- Die Forschung identifiziert Potenziale in alternativen Recycling- und Verwertungsverfahren, etwa im Bereich des chemischen Recyclings.
- Eine gezielte politische Steuerung ist notwendig: Umweltziele müssen definiert und regulatorisch verankert werden. Ein funktionierendes EPR-System kann die nötigen Strukturen für die ökologisch nachhaltige und effiziente Verwertung von Textilien schaffen.

Die Literaturrecherche umfasst mehrere Datenbanken, die jeweils spezifische Ziele der Recherche adressieren. Dadurch ergibt sich ein umfassendes Gesamtbild. Ausgewertet wurden unter anderem die Wissenschaftsdatenbanken Google Scholar und ISI Web of Science. Zur Identifizierung und Zuordnung wichtiger Marktakteure in Deutschland und der EU wurde in weiteren Quellen recherchiert.

Die Interviews umfassten einerseits Befragungen von Experten bzw. Vertretern aus der Forschung und andererseits von Vertretern der Industrie. Durch diese Aufteilung war es möglich, einerseits das branchenübergreifende Wissen der Experten und andererseits das spezifische Wissen der Industrieteilnehmer über ihr jeweiliges Umfeld innerhalb der Wertschöpfungskette abzufragen.

In Bezug auf die Analyse der Wissenschaftsdatenbanken beschreiben 56 % der Publikationen überwiegend den Stand der Forschung. In der zweiten Teilrecherche wurden in Wirtschaftsdatenbanken gezielt die aktuellen Akteure im Textilrecycling identifiziert. Dabei zeigten sich gravierende Unterschiede zwischen dem Stand der Forschung und dem aktuellen Marktgeschehen. Aktuell bedeutet Textilrecycling im industriellen Maßstab ausschließlich mechanisches Recycling.

Im Ergebnis der Interviews besteht in Bezug auf die technische Reife unter allen Befragten Einigkeit darüber, dass das mechanische Recycling derzeit das einzige in industriellem Maßstab praktizierte Verfahren im Textilrecycling ist. Dazu gehören die vorgeschalteten Stufen der Sammlung und Sortierung sowie die nachgeschaltete Weiterverarbeitung zu Vliesstoffen bzw. Garnen/Geweben und die thermische Verwertung von Reststoffen.

Für die weiteren Verfahren des thermischen und chemischen Recyclings gibt es bislang zwar eine große Zahl kleiner Akteure im Forschungs- und Pilotanlagenmaßstab, aber nur eine Anlage im kleinen Industriemaßstab für das chemische Recycling.

Auffällig ist in den Interviews die häufige Nennung fehlender bzw. unzureichender gesetzlicher Rahmenbedingungen, die als Hemmnis für ein funktionierendes Textilrecycling gesehen werden.

Insgesamt bieten die Ergebnisse der verschiedenen Teile dieser Studie somit ein weitgehend einheitliches Bild.

1

Einleitung

Die Studie beleuchtet Zielsetzung, Status quo und Entwicklungsbedarfe im Bereich Recycling- und Verwertungsverfahren für Textilien.

Derzeit bestehende Datenlücken zu Verfahren und Stoffströmen hemmen Innovation, behindern gezielte Fördermaßnahmen und erschweren die Ausgestaltung wirkungsvoller regulatorischer Vorgaben. Diese Lücken zu schließen war ein Ziel dieser Studie.

Die Stiftung GRS verfolgt das Ziel, textile Kreisläufe aktiv mitzugestalten, sinnvolle Verwertungswege zu stärken und ein funktionierendes EPR-System von Anfang an effektiv aufzusetzen.

Eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Verwertung liegt nicht nur im öffentlichen Interesse, sondern auch im Interesse der Hersteller.

Die Studie gibt einen kompakten Überblick über aktuelle Verfahren und Entwicklungen: Sie kombiniert wissenschaftlich-technische Expertise mit praktischer Erfahrung aus Industrie und Regulatorik – auch mit Blick auf die notwendige Normierung von Recyclingbegriffen.

2

Literaturrecherche

Für diese Studie wurde zunächst wurde eine Literaturrecherche zum Stand der Technik und Entwicklungsbedarf zu Recycling- und Verwertungsverfahren für Textilien durchgeführt. Aufbauend auf einer Analyse verschiedener Datenbanken umfasst diese einerseits eine bibliometrische Auswertung der Literatur zu verschiedenen Bereichen des Textilrecyclings und andererseits eine inhaltliche Auswertung des aktuellen Stands der Technik in den einzelnen Bereichen.

2.1

Struktur der Recherche

Die Literaturrecherche umfasst mehrere Datenbanken, die jeweils spezifisch Ziele der Recherche adressieren. Dadurch wird ein umfassendes Gesamtbild ermöglicht.

Zur Abbildung des wissenschaftlich-technischen Rahmens wurden frühere Studien anderer Akteure^{1-4, 85, 112} analysiert und die folgenden **Wissenschaftsdatenbanken** herangezogen:

- Google Scholar als umfassende internationale Datenbank
- ISI Web of Science (ISI WoS) als Wissenschaftsdatenbank
- Ergänzend dazu Recherche in
 - Researchgate als wissenschaftlichem Netzwerk
 - interner Datenbank des FIBRE
 - laufender eigener Literatursichtung

Zur Identifizierung und Zuordnung wichtiger Marktakteure in Deutschland und der EU wurden die folgenden **Wirtschaftsdatenbanken** und gleichartig nutzbare Quellen herangezogen:

- Datenbank OpenCorporates (Firmenregister)
- Mitgliederliste des Fachverbands Textilrecycling im BVSE
- Wirtschaftsdatenbank factiva
- Tagungsbände der Konferenz re4tex („*Recycling for Textiles*“)

Dieses breite Spektrum verschiedener Quellen erwies sich als notwendig, da viele neuere Entwicklungen des Textilrecyclings, vor allem im Bereich des thermophysikalischen und chemischen Recyclings in der wissenschaftlichen Literatur zwar breiten Raum einnehmen, aber in der industriellen Praxis jedoch nur in geringem Umfang bisher umgesetzt worden sind bzw. dort durch Akteure vorangetrieben werden, die durch ihr Kerngeschäft nicht dem Recycling, sondern anderen Branchen zugeordnet sind. Beispiele dafür sind:

- Maschinenbauer, die z. B. mit Schneid-, Reiß- oder Mahlwerken das Textilrecycling adressieren, aber nicht dem Textilmaschinenbau zugeordnet werden

- Zellstoffwerke, die neben Holz auch Chargen von Alttextilien zu Zellstoff oder zu neuen zellulosischen Fasern verarbeiten
- Akteure der chemischen Industrie, die aus textilen Rezyklatströmen synthetische Polymere aufreinigen und wieder zu neuen Fasern oder anderen Produkten verarbeiten

Die Recherche liefert einen guten Einblick in den aktuellen Stand der Technik und zeigt welche Akteure in welchen Bereichen tätig sind. Die Ergebnisse sind in den folgenden Unterabschnitten nach dem oben geschilderten Schema dargestellt.

2.2

Ergebnisse der Literaturrecherche

2.2.1 Bibliometrie

2.2.1.1 Wissenschaftsdatenbanken

Die Literaturrecherche in den Wissenschaftsdatenbanken soll so weit wie möglich konsistent mit der bestehenden Literatur sein. Deshalb wurde die Suche mit den in der Studie der TU Wien zu Textilrecyclingtechnologien⁸⁵ verwendeten und für diese Suche sinnvollen Suchbegriffen durchgeführt:

1. Textile recycling
2. Textile sorting
3. Chemical textile recycling
4. Cotton recycling
5. PET textile recycling
6. Post-consumer textiles
7. Textile waste
8. Mechanical textile recycling
9. Textile waste recycling
10. Textilrecycling
11. Baumwollrecycling
12. PET-Textil Recycling
13. Textilsortierung
14. Textilabfälle
15. Post-Consumer Textilien
16. Mechanisches Textilrecycling
17. Textilabfall
18. Chemisches Textilrecycling

Mit diesen Suchbegriffen wurde sowohl in Google Scholar, als auch in ISI Web of Science recherchiert. Da die Suchen zum Teil mehrere 10.000 Ergebnisse lieferten, wurde im zweiten Durchgang der Suchbereich auf die Jahre ab 2020 eingeschränkt, um damit gleichzeitig die aktuelleren Entwicklungen herauszufiltern. In [Tabelle 1](#) ist das Ergebnis der Recherche in Form von Anzahl der Fundstellen pro Suchbegriff dargestellt.

Für allgemeine Begriffe wie „textile recycling“ oder „textile waste“ liefern beide Datenbanken erwartungsgemäß große Trefferzahlen, die mit zunehmend detaillierter Spezifizierung kleiner werden. Auffällig ist, dass ISI WoS überhaupt keine deutschsprachige Literatur indiziert hat – die Trefferzahlen aller deutschen Suchbegriffe sind null. Die deutschsprachigen Trefferzahlen in Google Scholar sind gegenüber den englischen zwar kleiner, umfassen pro Suchbegriff aber immer noch bis zu 200 Treffern. Die Quote deutschsprachiger Publikationen entspricht mit rund 1,2 % auch dem Erwartungshorizont für den Anteil gegenüber den englischen Publikationen. Gleichzeitig spiegelt das Ergebnis ein Forschungsfeld mit neueren Entwicklungen wider: von den insgesamt rund 40.142 Treffern in Google Scholar sind 21.319 (53,1 %) in den letzten 4 Jahren publiziert worden. Bei ISI WoS ist die Quote mit 52,4 % von 30.066 Treffern ähnlich hoch. Die Ergebnisse sind detailliert in Tabelle 1 aufgeführt.

Tendenziell lässt sich sagen, dass die detaillierte Stichwortsuche nach im Textilrecycling relevanten Prozessen („chemical textile recycling“, „PET textile recycling“, „mechanical textile recycling“ und „textile waste recycling“) in ISI deutlich mehr Treffer liefert als Google Scholar. Die neueren Entwicklungen im Bereich der Forschung z. B. zu chemischem Recycling sind hier besser abgebildet. Publikationen auf Deutsch, die vorrangig Entwicklungen im deutschen Sprachraum betreffen, sind hingegen in Google Scholar enthalten.

Tabelle 1: Ergebnisse der Recherche in Google Scholar, ISI WoS und Researchgate.

Lfd. Nr./Suchbegriff	Anzahl Fundstellen							
	Google Scholar			ISI Web of Science			Researchgate	
	Gesamt	ab 2020	in %	Gesamt	ab 2020	in %	Gesamt	ab 2020
1. Textile recycling	6.300	3.760	59,7	4.960	2.793	56,3	42.600	12.890
2. Textile sorting	476	331	69,5	663	261	39,4	12.180	9.179
3. Chemical textile recycling	90	57	63,3	1.352	798	59,0	12.180	2.716
4. Cotton recycling	339	222	65,5	1.490	849	57,0	4.628	1.255
5. PET textile recycling	8	4	50,0	487	297	61,0	7.350	2.189
6. Post-consumer textiles	703	427	60,7	218	156	71,6	4.241	1.368
7. Textile waste	30.700	15.600	50,8	17.082	8.159	47,8	11.030	3.704
8. Mechanical textile recycling	124	93	75,0	1.254	819	65,3	28.510	7.766
9. Textile waste recycling	919	619	67,4	2.560	1.630	63,7	12.700	4.173
10. Textilrecycling	200	79	39,5	0	0		9	2
11. Baumwollrecycling	3	2	66,7	0	0		0	0
12. PET-Textil Recycling	1	1	100,0	0	0		56.310	1.735
13. Textilsortierung	12	9	75,0	0	0		1	1
14. Textilabfälle	196	63	32,1	0	0		2	0
15. Post-Consumer Textilien	6	6	100,0	0	0		41.150	1.334
16. Mechanisches Textilrecycling	2	2	100,0	0	0		437	30
17. Textilabfall	61	43	70,5	0	0		0	0
18. Chemisches Textilrecycling	2	1	50,0	0	0		1.377	40
Gesamt	40.142	21.319	53,1	30.066	15.762	52,4		
Anteil Englisch in Prozent	98,80			100				

Eine erste Filterung der gefundenen Literatur im Hinblick auf die Ziele dieser Studie lieferte aus der Datenmenge noch 80 relevante Publikationen, die überwiegend in beiden Datenbanken vertreten sind. Im folgenden Abschnitt erfolgt eine Bewertung dieser Literatur

in Bezug auf den inhaltlichen Schwerpunkt und die technische Reife der beschriebenen Prozesse. Diese Bewertung zeigt deutlich, dass in die gefundene Literatur – wie in Wissenschaftsdatenbanken zu erwarten – überwiegende den Stand der Forschung beschreibt. Gleichzeitig sind darin nur wenige konkrete Daten zu aktuellen Marktteilnehmern enthalten. Diese wurden, wie in [Abschnitt 2.2.2](#) geschildert, in einer weiteren Recherche in Markt- & Wirtschaftsnachrichten erhoben.

2.2.1.2

Kategorisierung der Literatur

Die oben geschilderten Quellen wurden wie folgt zusammengeführt und ausgewertet:

- Recherche in Google Scholar und ISI Web of Science mit o. g. Suchbegriffen und Eingrenzung auf Literatur ab 2020; davon nur technisch relevante berücksichtigt
- Ergänzung durch Researchgate, interne Datenbank sowie laufende eigene Literatursichtung
- Sonderfall Researchgate (Ergebnisse [Tabelle 1](#)): intransparente Suchalgorithmen, keine komplexen Abfragen möglich. Aber bei Sortierung nach „Relevanz“ sind auf den ersten beiden Seiten 10 Treffer, davon 8 bereits in Google/ISI gefundene und relevante, zu finden
 - geeignet zur Schnellorientierung, aber (leider) nicht belastbar.
- Insgesamt wurden **115 Datensätze** ausgewertet

Die Art der Kategorisierung deckt mehrere Bereiche ab. Die Kategorien der ersten Gruppe erlauben eine inhaltliche Einordnung der jeweiligen Publikation nach Teilgebiet innerhalb der Wertschöpfungskette des Textilrecyclings. Zusätzlich gibt es Kategorien „keine Angabe“ und „Sonstiges“. Die Kategorien der zweiten Gruppe erlauben die Einstufung des technischen Reifegrades der beschriebenen Technologien von „Forschung“ bis „Technisch umgesetzt“ sowie die Einordnung der Publikation nach den Kriterien „Ökonomie“ und „Ökologie“. Als Ergänzung werden die Publikationen zusätzlich noch nach den bibliometrischen Kriterien „Review“ und „Tagungsband“ als Kennzeichnung für Übersichtsliteratur kategorisiert.

Entsprechend der Art der Kategorisierung sind die meisten Publikationen in mehrere Kategorien einklassiert. Dementsprechend ist das Ergebnis als prozentualer Anteil der Nennungen bezogen auf den Gesamtumfang von 115 Publikationen in [Abbildung 1](#) dargestellt. Wie zu erwarten, beschreiben 56 % der Publikationen den Stand der Forschung. Fast 30 % beschreiben technisch umgesetzte Verfahren; weitere 15 % Pilotanlagen. Insgesamt behandelt rund ein Drittel der Literatur Aspekte der Ökonomie (12 %) bzw. Ökologie (17 %).

Bezogen auf den Teil der Wertschöpfungskette befassen sich 80 % der Publikationen mit dem Mechanischen Recycling (40 %) und dem Monomerrecycling (41 %). Auch die Textilsortierung hat mit 30 % der Nennungen einen wesentlichen Anteil.

Die Bereiche Teppich- und Matratzenrecycling sind dagegen mit lediglich 1–2 % der Nennungen offensichtlich kaum Gegenstand aktueller Forschung.

Die erfasste Literatur besteht zu rund einem Drittel aus Reviews (28 %) und Tagungsbänden (5 %) und bietet somit auch einen guten Überblick über die aktuellen Entwicklungen, der damit auch die Jahre vor dem Betrachtungszeitraum abdeckt.

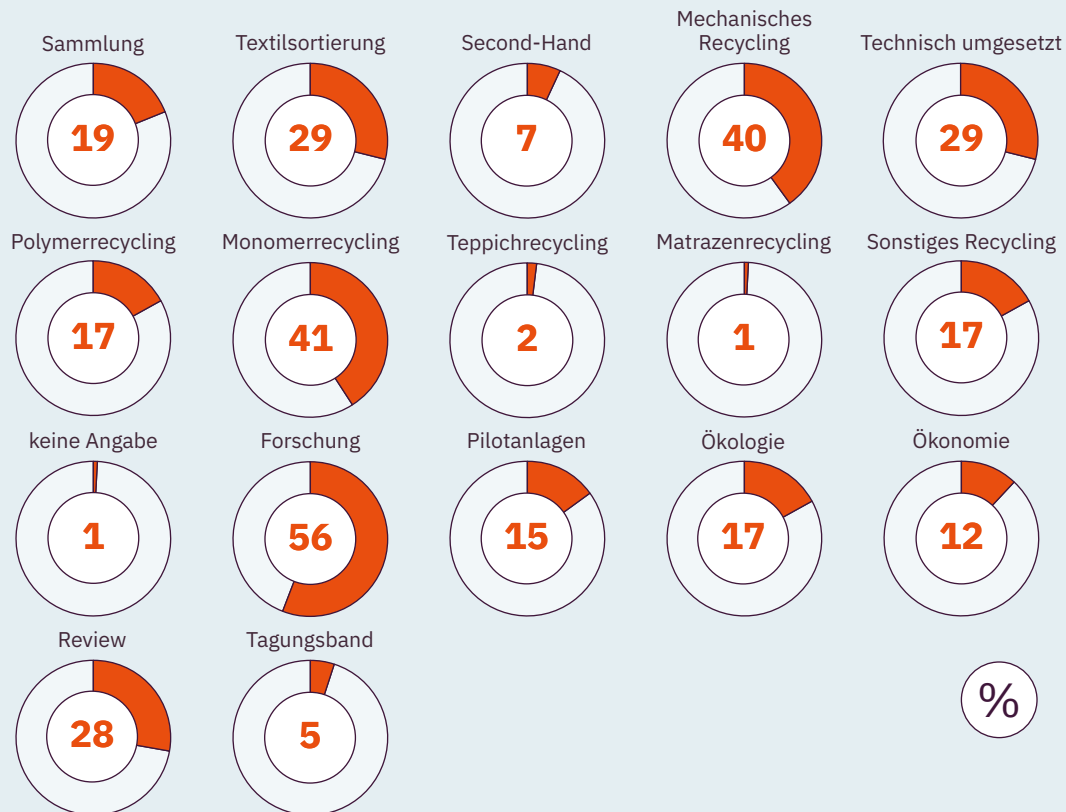


Abbildung 1: Kategorisierung der gefundenen Literaturstellen. Anzahl Nennungen in 115 Datensätzen aus Recherche in Google Scholar, ISI WoS & Researchgate, Jahre 2020–2024; Angaben in Prozent.

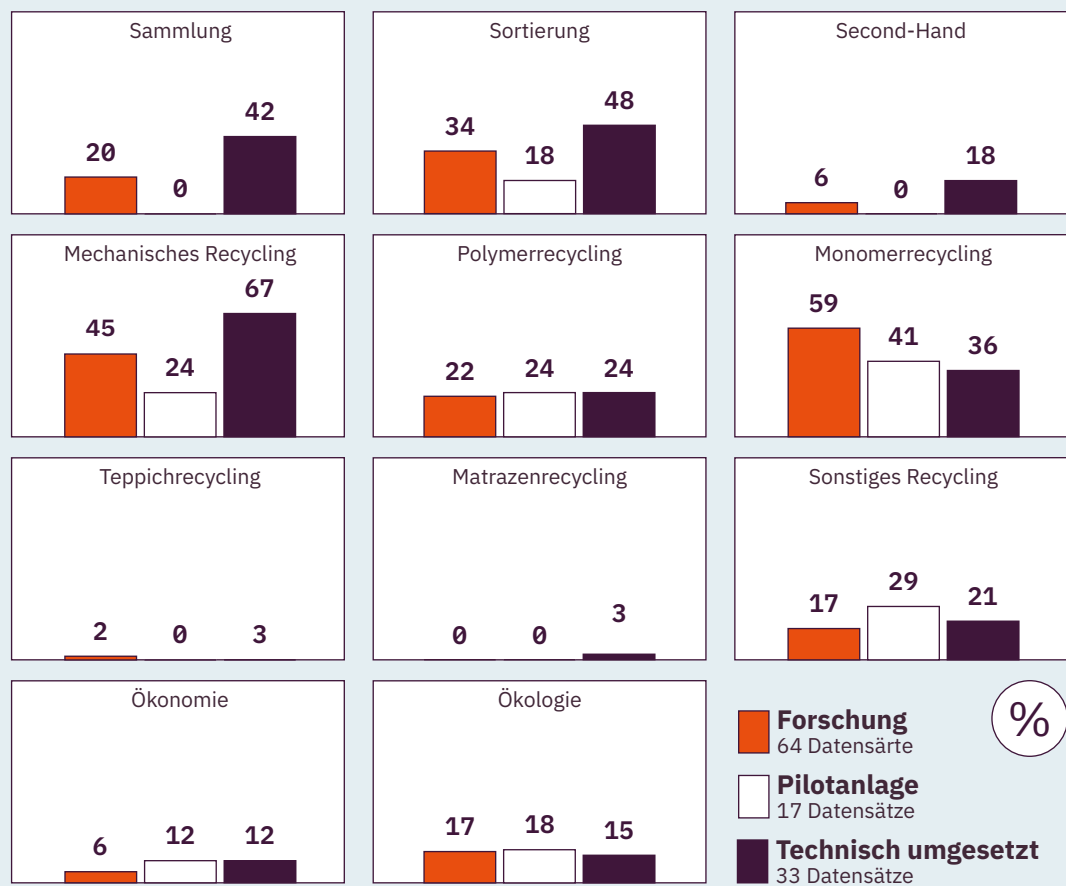


Abbildung 2: Kategorisierung der Literatur aufgeschlüsselt nach den Bereichen „Technisch umgesetzt“, „Pilotanlage“ und „Forschung“, Angaben in Prozent.

Im Detail unterscheiden sich die Schwerpunkte der Literatur deutlich nach dem Stand der technischen Reife. In  Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Kategorisierung separat für die Nennungen in den Kategorien „Technisch umgesetzt“, „Pilotanlage“ und „Forschung“ dargestellt.

Die Literatur im Bereich „Technisch umgesetzt“ konzentriert sich mit 67 % der Nennungen sehr stark auf das Mechanische Recycling, gefolgt von der Sortierung (48 %) und der Sammlung (42 %) – also den „klassischen“ Bereichen der Textilrecycler. Dies spiegelt sich auch in dem mit 39 % höchsten Anteil von Reviews wider, die als Übersicht auch diesen Bereich repräsentieren. Umgekehrt liefern die Reviews auch die Nennungen für Polymer- (24 %) und Monomerrecycling (36 %), die damit hier ebenfalls relativ stark vertreten sind.

Die Literatur im Bereich „Pilotanlage“ konzentriert sich dagegen deutlich auf das Monomerrecycling (41 %), gefolgt vom Sonstigen Recycling mit 29 %. Mechanisches Recycling und Polymerrecycling spielen beide mit 24 % eine nachgeordnete Rolle.

Die Literatur im Bereich „Forschung“ konzentriert sich nochmals stärker auf das Monomerrecycling (59 %), gefolgt vom Mechanischem Recycling (45 %) und Sortierung (34 %). Auch hier ist ein hoher Anteil von Reviews mit 36 % der Nennungen zu verzeichnen. Auffällig ist dabei, dass das Polymerrecycling in allen drei Bereichen etwa gleich stark mit > 20 % genannt wird, aber im Vergleich zum Monomerrecycling eine deutlich schwächere Rolle einnimmt.

2.2.2 Wirtschaftsdatenbanken

Dieser Teil der Recherche wurde in den folgenden Datenbanken/Quellen durchgeführt:

- Datenbank OpenCorporates (Firmenregister), Suche nach „Textilrecycling“¹²⁰: ergibt 51 Firmen, davon 32 aktive (48 bzw. 29 davon in Deutschland)
 - **29 relevante Datensätze** (aktive Firmen in Deutschland) wurden ausgewertet
- Datenbank factiva, Suche nach „Textilrecycling“ wurde ausgewertet, Einschränkung auf das Thema „Unternehmens- & Branchennachrichten“ der letzten zwei Jahre sowie auf die Sprachen Deutsch oder Englisch¹²¹:
303 Datensätze, davon 35 technologierelevant, bereinigt um 8 doppelte
 - **27 technologierelevante** Datensätze ausgewertet
- Mitgliederliste des Fachverbands Textilrecycling im BVSE¹²² (Stand 17.10.2024):
71 Firmen
 - **71 Datensätze** wurden ausgewertet

Die Datenbasis ist hier zwar erheblich kleiner als in den Wissenschaftsdatenbanken, dafür aber auf den eigentlichen Kern der betrachteten Branche fokussiert und somit von hoher Aussagekraft. Parallel zur Auswertung der Wissenschaftsdatenbanken und der in den Industrie- sowie Expertenfragebögen verwendeten Detailspezifikation wurden die gefundenen Datensätze nach den Bereichen des Textilrecyclings klassifiziert:

- Sammlung
- Second-Hand
- Sortierung
- Mechanisches Recycling
- Polymerrecycling

- Monomerrecycling
- Sonstiges Recycling

Dazu wurde die nur in der BVSE-Mitgliederliste vorhandene Kategorie „Händler“ in die Auswertung in diesem Abschnitt mit aufgenommen. Mehrfachnennungen sind dabei möglich.

Wie in  Abbildung 3 dargestellt, fällt insbesondere auf, dass in allen Datenquellen die Zahl der Nennungen in den Kategorien des eigentlichen Recyclings relativ gering ist. Der wesentliche Teil der Nennungen bezieht sich auf die vorgeschalteten Bereiche des Recyclings, d. h. Sammlung, Second-Hand und Sortierung, sowie (nur BVSE-Mitglieder) Händler. Der eigentliche Recyclingbereich wird in OpenCorporates noch schlechter als in factiva und BVSE erfasst: OpenCorporates verzeichnet nur Nennungen im mechanischen Recycling.

Insgesamt ist deutlich zu erkennen, dass ausschließlich factiva Ergebnisse liefert, die zu großen Teilen (zusammen fast 60 %) auf Recyclingverfahren fokussiert sind. OpenCorporates liefert noch 15 % Nennungen für mechanisches Recycling, während die BVSE-Liste insgesamt 14 % für mechanisches, Polymer- und Monomerrecycling liefert. Dies spiegelt in etwa den Stand der etablierten Wirtschaft wider. Wesentlich sind nur Sammlung, Sortierung & Handel.

Detailliert ist der aktuelle Stand aus OpenCorporates und BVSE-Mitgliederliste:

- überwiegend Sammlung, Sortierung und Handel (Export)
- zum kleinen Teil mechanisches Recycling (Putzlappen/Reißfasern für Vliese)
- 2 Firmen betreiben eine PET-Schmelze als Recycling
- 1 Start-up betreibt die Erzeugung von PET- und Cellulose-Monomeren aus PET- und Baumwolltextilien

Aktuelle Entwicklungen aus factiva sind:

- Die Bereiche Sammlung/Sortierung sowie Recycling werden mit jeweils ca. 60 % am häufigsten genannt
- Sammlung 9 Nennungen, darunter Sensortechnik für „intelligente“ Sammelcontainer
- Sortierung 8 Nennungen, davon 2 automatische Anlagen im Industriemaßstab ausgeliefert und 1 Pilotanlage mit Integration von KI
- Mechanisches Recycling: 2 Reißereianlagen ausgeliefert, 1 Firmenübernahme Airlay, 1 Cottonrecycling (alles Industriemaßstab)
- Polymerrecycling: 1 PA-Recycling, 2 PET-Recycling (alles Industriemaßstab)
- Monomerrecycling: 3 Celluloserückgewinnung im Industriemaßstab, je 1 PA-, PET- und enzymatische PET-Rückgewinnung (alles Pilotanlagen/Start-ups)

Insgesamt liefert die Recherche in den Wirtschaftsdatenbanken somit einen guten Überblick in die aktuell am Markt tätigen Akteure. Gleichzeitig sind gravierende Unterschiede zwischen dem Stand der Forschung und dem aktuellen Marktgeschehen erkennbar: aktuell bedeutet Textilrecycling im industriellen Maßstab ausschließlich mechanisches Recycling. Für das Polymerrecycling wurden zwar bereits einzelne Anlagen ausgeliefert. Das bedeutet jedoch nicht, dass dieser Prozess weit verbreitet angewendet wird oder große Marktanteile hat  Auswertung der Interviews.

Noch gravierender ist die Diskrepanz beim chemischen/Monomerrecycling: es nimmt in der wissenschaftlichen Literatur einen breiteren Raum als die anderen Recyclingprozesse ein, ist aber in der industriellen Umsetzung bisher nur in der Größenordnung von Start-ups oder Pilotanlagen angekommen. Die einzige Ausnahme ist hier die Kooperation von Södra

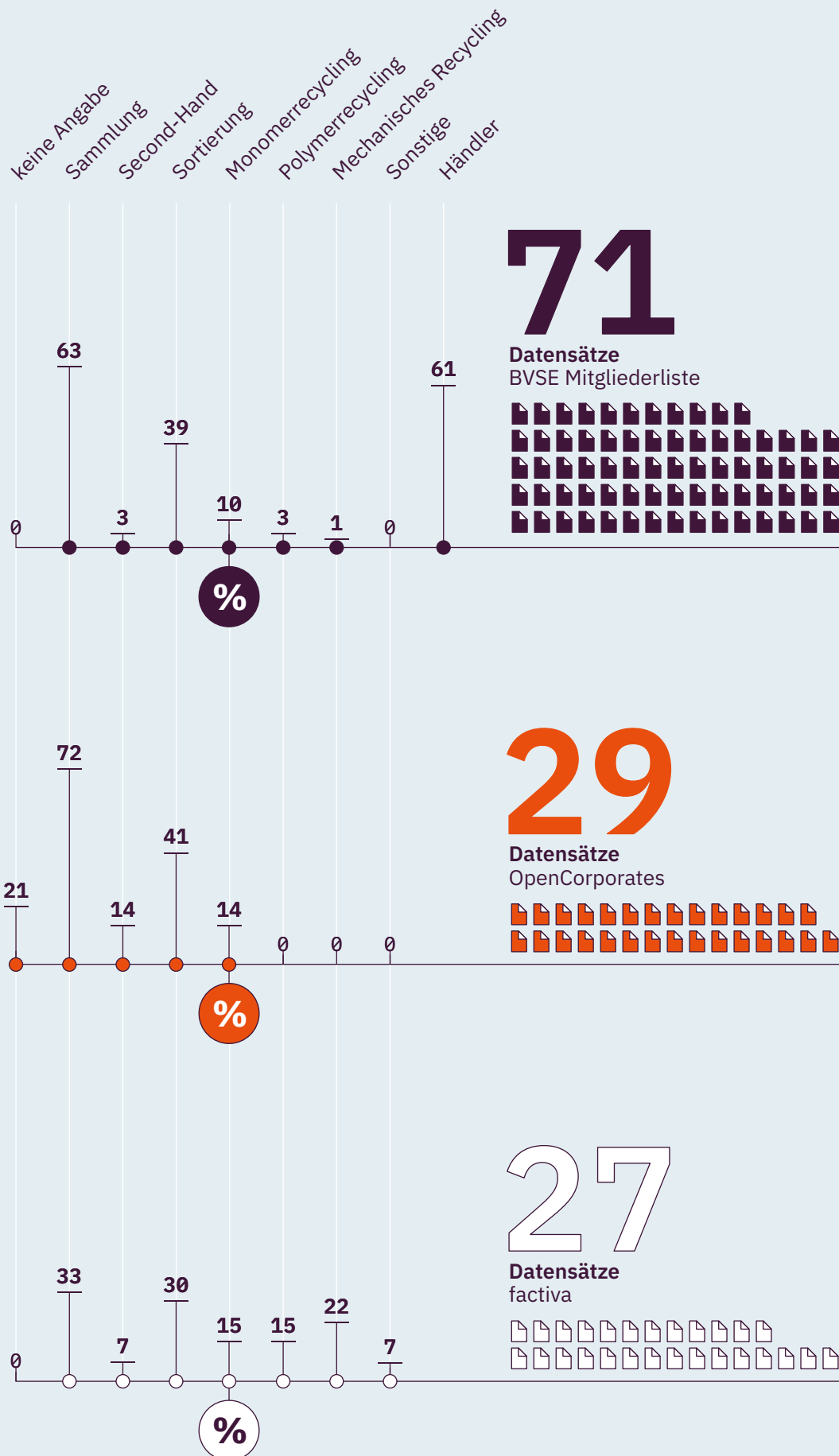


Abbildung 3: Prozentuale Ergebnisse der Recherche in Wirtschaftsdatenbanken.

und Lenzing, die eine Anlage zum Recycling von Cellulose aus Baumwolltextilien (Södra) betreiben, um diese Cellulose in ReFibra-Fasern (Lenzing) wiedereinzusetzen. Siehe hierzu auch die Auswertung der Interviews mit weiteren Details.

Eine inhaltliche Lücke besteht in der Identifikation von Akteuren, die die Textilrecycler mit Anlagen beliefern. Diese gehören klassisch zu den Maschinenbauern bzw. zum Teil auch zum Bereich Chemie und sind durch die verwendeten Suchstrategien nur schlecht bzw. unvollständig abgebildet. Umgekehrt ist der Kreis der Anlagenlieferanten in Europa allerdings klein, sodass alle relevanten Akteure im Kreis der Textilrecycler bekannt sind. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, infrage kommende Anlagenbauer durch eine gezielte Detailanalyse der in dieser Studie erfassten Literatur zu identifizieren. Dies erfolgt im Rahmen der inhaltlichen Auswertung in den folgenden Abschnitten.

2.2.3 Inhaltliche Auswertung der Literatur

Insgesamt wurden 115 Quellen aus den Wissenschaftsdatenbanken ausgewertet^{5–119}, die alle relevanten Bereiche des Textilrecyclings abdecken.

- 22 Quellen behandeln den Bereich der **Sammlung**; darunter sind 13 Reviews/Studien, die das Thema Sammlung meist im Rahmen der Stoffstrombetrachtung behandeln. Ebenso viele Quellen behandeln Forschungsaktivitäten im Bereich der Sammlung. Eine Umsetzung im Pilotanlagenmaßstab wurde in diesen Quellen nicht beschrieben (keine Nennung), jedoch beschreiben 14 Quellen den aktuell umgesetzten Standard. Nur je drei Quellen befassen sich mit ökonomischen bzw. ökologischen Aspekten.
- 33 Quellen befassen sich mit dem Bereich **Sortierung**; darunter sind 11 Reviews/Studien, die das Thema Sortierung wie die Sammlung meist im Rahmen der Stoffstrombetrachtung abhandeln. Lediglich eine Quelle¹¹⁰ behandelt als Review direkt den Status der Sortierung. 22 Quellen befassen sich mit Forschungsaktivitäten im Bereich der Sortierung. Die Umsetzung im Pilotanlagenmaßstab wird in drei Quellen beschrieben; der aktuell umgesetzte Standard in vier Quellen. Nur fünf Quellen befassen sich mit ökonomischen, sowie drei Quellen mit ökologischen Aspekten.
- 8 Quellen befassen sich mit dem Bereich **Second-Hand**; davon sind 6 Reviews, die diesen Bereich mit abhandeln. Dazu kommen ein Forschungsartikel¹⁴ sowie das Müllhandbuch, das den Stand der Technik beschreibt¹⁷.
- 46 Quellen befassen sich mit dem Bereich des **Mechanischen Recyclings**; darunter sind 19 Reviews/Studien. 29 Quellen behandeln Forschungsaktivitäten im Bereich des Mechanischen Recyclings. Die Umsetzung im Pilotanlagenmaßstab wird in vier Quellen beschrieben; der aktuell umgesetzte Standard in 22 Quellen. Mit Aspekten der Ökonomie befassen sich vier, mit Aspekten der Ökologie sieben Quellen.
- 19 Quellen behandeln den Bereich des **Polymerrecyclings**; davon sind 12 Reviews/Studien. 14 Quellen behandeln Forschungsaktivitäten im Bereich des Polymerrecyclings. Die Umsetzung im Pilotanlagenmaßstab beschreiben vier Quellen; 8 Quellen den aktuell umgesetzten Standard. Nur zwei Quellen befassen sich mit ökonomischen, sowie fünf Quellen mit ökologischen Aspekten.
- 47 Quellen befassen sich mit dem Bereich **Monomerrecycling**; darunter befinden sich 22 Reviews/Studien. 38 der Quellen behandeln dezidiert den Stand der Forschung. Das

entspricht 80 % aller Literaturstellen dieses Bereichs. Die Umsetzung im Pilotanlagenmaßstab wird in sechs Quellen beschrieben; der aktuell umgesetzte Standard in sieben Quellen. Mit Aspekten der Ökonomie befassen sich zwei Quellen; mit Aspekten der Ökologie neun Quellen.

- Zwei Quellen befassen sich mit dem Bereich **Teppichrecycling**; das Müllhandbuch, das den Stand der Technik beschreibt und Malueiro et al. in ihrem Konferenzpaper von 2021. Hierzu ist anzumerken, dass zum Textilbereich lediglich Webteppiche gehören, die nur einen kleinen Marktanteil haben. Der deutlich größere Massenstrom der Teppichböden ist nicht erfasst. Vermutlich deshalb sind hier aktuell nur wenige Forschungsaktivitäten zu verzeichnen.
- Lediglich eine Quelle adressiert das **Matratzenrecycling**; das Müllhandbuch mit Stand der Technik. Da dieser Bereich nicht im Fokus der Studie lag, wurde in dieser Richtung nicht separat weiter recherchiert.
- **Sonstige Recyclingverfahren** werden von insgesamt 20 Quellen behandelt; sechs davon sind Reviews/Studien. 11 Quellen behandeln Forschungsaktivitäten im Bereich des Sonstigen Recyclings, z. B. das Recycling von Polsterstoffen oder Textilreparatur. Die Umsetzung im Pilotanlagenmaßstab wird in fünf Quellen beschrieben; der aktuell umgesetzte Standard in sieben Quellen. Mit Aspekten der Ökonomie befassen sich drei Quellen; mit Aspekten der Ökologie vier Quellen.

Die inhaltliche Auswertung dieser Daten umfasst einerseits strukturelle Aspekte wie Neuerungen in der Nomenklatur des Textilrecyclings und andererseits ökonomische Daten zu Marktumfang und Stoffströmen. Darüber hinaus werden technische Daten, die die Marktakteure und die angewandten Technologien identifizieren, dargestellt. Diese sind in den nachfolgenden Unterabschnitten separat aufgeführt.

2.2.3.1

Normung der Nomenklatur & Prozesse des Recyclings

In früheren Arbeiten zum Textilrecycling wurde häufig die uneinheitliche Verwendung von Begriffen kritisiert, was einen Überblick und Vergleich zwischen den Literaturquellen erschwert. Beispielhaft sei hier die Formulierung von Roithner et al.⁸⁵ im Wortlaut:

„Nach eingehender Sichtung der Literatur wurde eine Diskrepanz im Wording zur Einteilung der Prozesse im Textilrecycling erkennbar. Eminent ist v. a. die wenig eindeutige Abgrenzung der Begriffe, wenn die jeweils darunter verorteten Verfahren betrachtet werden.“

Auch die vorliegende Studie sah sich mit denselben Schwierigkeiten konfrontiert. Aus diesem Grund wurde dasselbe Such- und Klassierungsschema⁸⁵ verwendet, um zumindest innerhalb der verschiedenen Studien vergleichbar zu bleiben.

Für zukünftige Arbeiten dürfte das Ergebnis einer von der EU beauftragten Studie (Duhoux et al. 2021³⁰) von Vorteil sein. Die Studie „*Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling*“ teilt die Prozesse des Textilrecyclings klar in drei Hauptkategorien ein:

- Mechanisch,
- Thermisch und
- Chemisch.

Die Kategorien sind teilweise in weitere Unterkategorien unterteilt. Gleichzeitig erfolgte eine Bewertung der jeweiligen Prozessökonomie und des Umweltimpacts.

Das wichtigste Ergebnis der Studie dürfte jedoch die Erstellung einer Norm sein. Die seit 2023 gültige ISO 5157:2023–09 *Textiles – Environmental Aspects – Vocabulary*⁵⁰ regelt die Begrifflichkeiten der Prozesse im Textilrecycling eindeutig. Dadurch wird eine bessere Vergleichbarkeit der Literaturbasis zukünftiger Studien ermöglicht.

Ergänzend zur Norm haben einige Beteiligten (Stubbe et al. 2024¹⁰⁶) ein Whitepaper publiziert, in dem die Begrifflichkeiten detailliert erläutert und grafisch aufbereitet dargestellt werden. Aufgrund ihrer Bedeutung werden die Begrifflichkeiten im Folgenden detailliert dargestellt.

Die drei oben genannten Hauptkategorien sind in weitere Unterkategorien unterteilt. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der ISO 5157⁵⁰, welche lediglich die Nomenklatur der Unterkategorien definiert, und dem EU-Report³⁰ sowie dem Whitepaper¹⁰⁶, welche die Zuordnung in die in ➤ [Abbildung 4–8](#) dargestellten Kategorien beschreiben. Damit ergibt sich das folgende Schema:

- Das **Mechanische Recycling** ist unterteilt in Reißen sowie Schneiden/Mahlen und entspricht damit dem klassischen Verständnis.
- **Thermisches Recycling** umfasst das Schmelzen thermoplastischer Fasern (Thermomechanisches Recycling) sowie das „*Thermochemische Recycling*“ als Oberbegriff für Pyrolyse, Verflüssigung oder Vergasung des Materials, um daraus wieder Ausgangsmaterialien für neue Prozesse zu gewinnen.
- **Chemisches Recycling** schließt ausdrücklich auch biochemische und biotechnologische Verfahren ein. Das Chemische Recycling muss generell zur Gewinnung von „*Polymere, Monomere, Zwischenprodukten oder anderen Materialien*“ führen und umfasst damit eine ganze Reihe verschiedener Prozessvarianten.

In diesem Schema wird das mechanische Recycling eher als Vorstufe des thermischen bzw. chemischen Recyclings beschrieben und hat somit auch aus Sicht der EU-Organen noch langfristig eine wichtige Funktion. Das thermische Recycling ist aus Sicht der Autoren dieser Studie eine Kompromissgruppe, in der die Verfahren zusammengefasst wurden, die sich weder dem mechanischen noch dem klassischen chemischen Recycling zuordnen lassen und bei denen der kleinste gemeinsame Nenner die Durchführung bei erhöhten Temperaturen ist. Hier besteht eine Inkonsistenz zur Nomenklatur der ISO 5157. In der ISO 5157⁵⁰ sind die thermochemischen Prozesse als Bestandteil der Definition 3.2.6.5 (chemical recycling, feedstock recycling) – und somit des chemischen Recyclings. In den Kategorien des EU-Reports ➤ [Abbildung 4–8](#) sind sie dagegen Bestandteil des thermischen Recyclings. Das chemische Recycling umfasst dann wiederum alle Verfahren (inklusive biotechnologischer), die auch ein Laie automatisch dort einordnen würde. In der Definition 3.2.6.5 in ISO 5157 sind als Beispiele hierfür „*Depolymerisierung, Solvolyse, Katalyse, (katalytische) Reformierung, Aufreinigung, Hydrierung, Lösung, Dehydrochlorinierung, und andere ähnliche existierende oder neu entwickelte Technologien bzw. Prozesse*“ genannt.

Die Autoren des Whitepapers von 2024¹⁰⁶ haben die Unschärfe im Bereich des Thermischen Recyclings umschifft, indem sie nur das Schema des mechanischen Recyclings als zusammengefasste Darstellung zeigen und im Folgenden nur Schemata für die Prozesse der Untergruppen präsentieren. Dadurch ist ein gut handhabbares Schema entstanden, das hoffentlich in Zukunft auch in der Literatur Verbreitung finden wird.

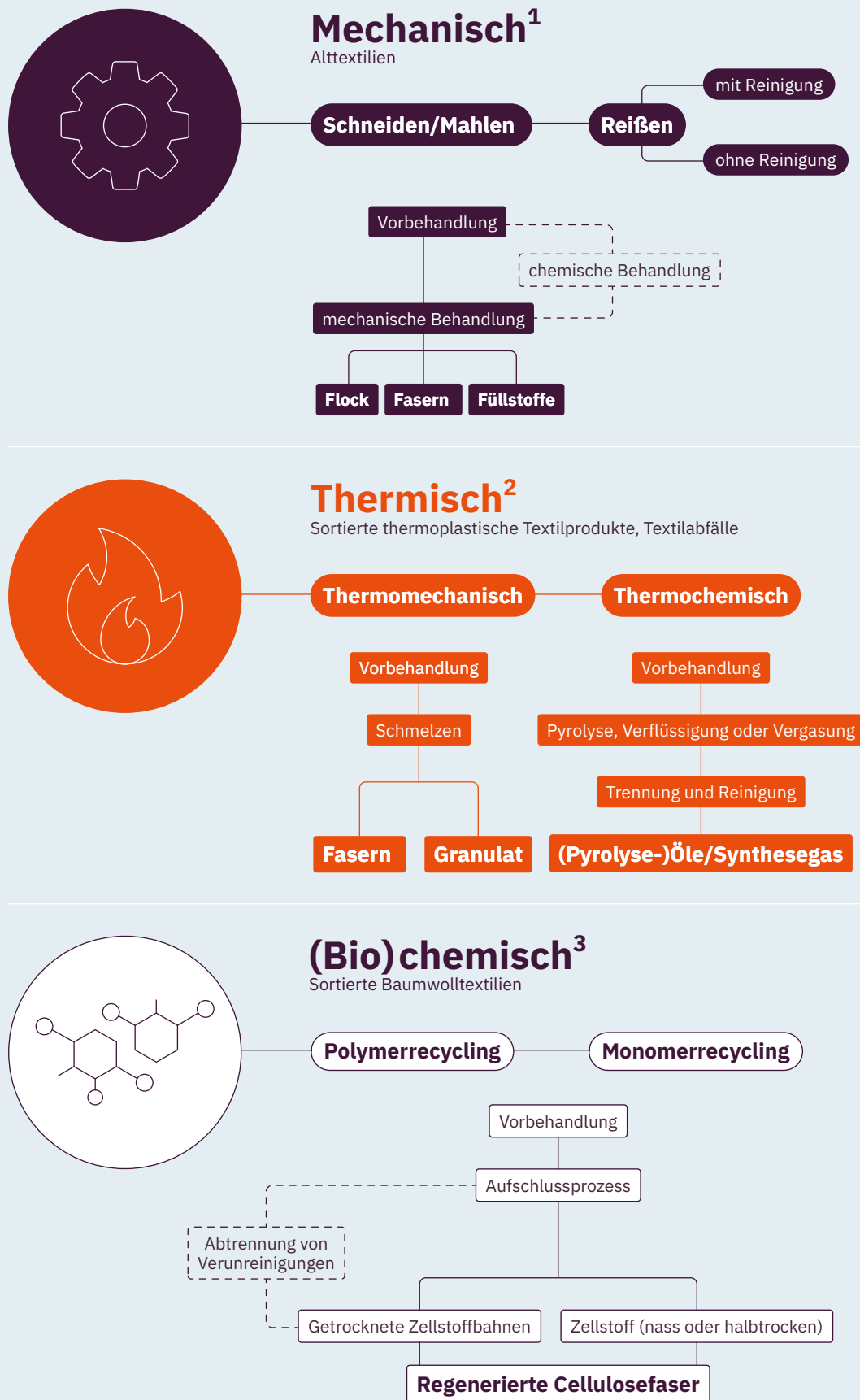


Abbildung 4: Kategorien der Recyclingprozesse nach ISO 5157³⁰ sowie Schemata des mechanischen (1), thermomechanischen/thermochemischen (2, „Gasification“) und chemischen (3, am Beispiel Cellulose) Recyclingprozesses nach ISO 5157¹⁰⁶.

In ➤ Abbildung 4–8 ist das Schema des Mechanischen Recyclings dargestellt, das den klassischen Behandlungsprozess für Alttextilien darstellt und zu Flock, Fasern oder Füllstoffen als Zwischenprodukten führt.

Die Schemata des thermomechanischen und des thermochemischen Prozesses sind in ➤ Abbildung 4–8 bzw. ➤ Abbildung 4–8 dargestellt. Beim thermomechanischen Prozess handelt es sich um ein physikalisches Verfahren, bei dem Thermoplaste aufgeschmolzen und die Schmelze ohne chemische Veränderung wieder zu Fasern oder Pellets verarbeitet wird.

Die Schemata des chemischen Textilrecyclings unterscheiden sich je nach Polymertyp bzw. genutztem chemischen Verfahren. In ➤ Abbildung 4–8 ist beispielhaft der Prozess des Celluloserecyclings dargestellt, bei dem Cellulose zu einem wiederverwertbaren Polymer aufgeschlossen und anschließend zu neuen Cellulosefasern verarbeitet wird. In einer Quelle ¹⁰⁶ werden weitere Prozesse dargestellt, die den Aufschluss bis zum Monomer und die nachfolgende Polymerisation zu neuen Produkten umfassen.

Alle geschilderten Prozesse sind nicht auf ein Closed-Loop-Recycling begrenzt, sondern ermöglichen ebenso ein Open-Loop-Recycling zu nicht-textilen Produkten.

In ➤ Abbildung 9 ist als Zusammenfassung von Stubbe et al. 2024 ¹⁰⁶ die ökonomische und ökologische Einordnung der beschriebenen Prozesse schematisch dargestellt. Neben dem Verbrauch von Energie, Wasser und Chemikalien sind die Kriterien dabei die Prozesskosten sowie die Möglichkeit, die Qualität des Rohmaterials wiederzuerlangen bzw. die Resilienz des Verfahrens gegen Verunreinigungen und Störstoffe. In der Darstellung ist die Tendenz eindeutig: Die bessere Fähigkeit zur Erzeugung von Virgin-Qualität geht mit einem höheren Input an Energie und anderen Ressourcen sowie entsprechend höheren Prozesskosten einher. Dies gilt ebenso für eine bessere Prozesstoleranz gegen Verunreinigungen.

Dementsprechend steht das aktuell praktizierte mechanische Recycling für geringe Kosten und einen geringen Ressourcenverbrauch, gleichzeitig aber auch für Produkte geringer Qualität, in denen Verunreinigungen verbleiben.

2.2.3.2

Marktumfang und Stoffströme

Das aktuelle Aufkommen an Textilabfällen in der EU, basierend auf Angaben der European Environment Agency 2024 ist fast 7 Mt pro Jahr ⁵³. Davon werden, wie in ➤ Abbildung 10 dargestellt, lediglich rund 2 Mt/a in der separaten Sammlung erfasst. Der Hauptanteil von rund 5 Mt/a gelangt über Rest- bzw. Haushaltsmüll gar nicht erst in den Kreislauf. Der Stoffstrom gliedert sich damit wie folgt ⁵³:

- **Post-Consumer:** 82,01 %
- **Pre-Consumer:** 17,99 %
- **Davon im Müll:** 71,94 %
- **Recycling, Verwertung etc.:** 14,68 %
- **Export:** 8,06 %
- **Verbrennung:** 2,73 %
- **Deponie:** 2,16 %

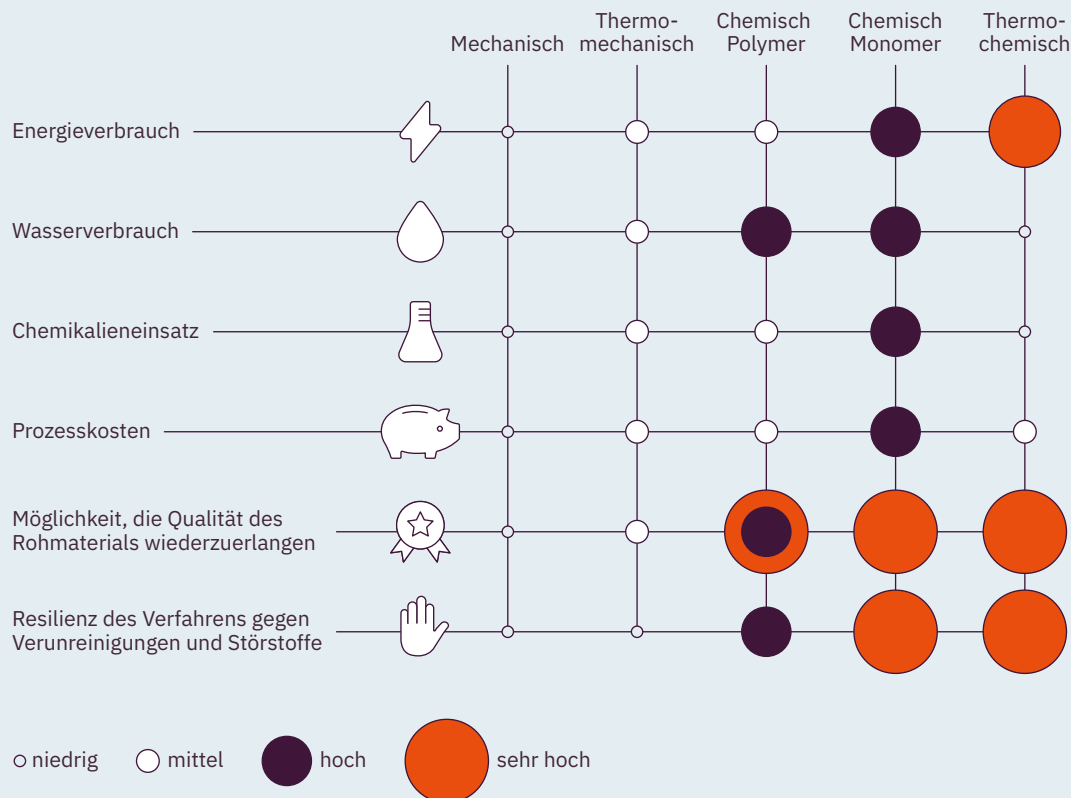


Abbildung 5: Bewertung der Prozesse nach ISO 5157 im Hinblick auf Ökonomie und Umweltimpact¹⁰⁶.

Das heißt, nur rund 28 % der Alttextilien werden überhaupt dem Recycling zugeführt. Davon wiederum geht fast ein Drittel (8,06 %) in den Export, wobei die Art der weiteren Verwendung nicht geklärt ist. Weitere rund 5 % werden verbrannt oder deponiert, sodass letztlich nur 15 % der Alttextilien in der EU dem Recycling zugeführt oder gesondert verwertet werden.

Ähnliche Zahlen existieren aus den USA. Laut Baloyi et al. 2024¹⁴ werden dort rund 80 % der Alttextilien verbrannt oder deponiert. D. h., es werden nur rund 20 % überhaupt einem Recycling zugeführt, und nur 1 % gelangen in ein Faser-zu-Faser Recycling. Die Statistik des Artikels wird von einer guten Literatursammlung über neue Entwicklungen im Textilrecycling begleitet, die aber überwiegend den Stand der Forschung beschreibt.

Damit ist in zwei wichtigen Wirtschaftsräumen der Welt der Stand des Textilrecyclings ausbaufähig. Hinzu kommt der Trend zu stetig wachsendem Textilkonsum. Wie Krause et al. 2024⁵³ anhand der Entwicklung der Produktion der wichtigsten Textilfasertypen weltweit seit 1960 zeigen, nimmt die Produktionsmenge nicht nur wegen der steigenden Weltbevölkerung zu. Auch der Pro-Kopf-Verbrauch der Weltbevölkerung steigt mit zunehmender Tendenz: von 6,6 kg (1960) über 9,1 kg (2000) auf 16,8 kg im Jahr 2020 ➔ [Abbildung 11](#). Im Umkehrschluss bedeutet das auch, dass für ein komplettes Recycling aller Alttextilien auch entsprechende Verarbeitungskapazitäten geschaffen werden müssten.

Einen guten Überblick über die aktuellen Entwicklungen im Bereich des mechanischen und (bio)chemischen Recyclings liefern Abrishami et al. 2024⁵. Wie in ➔ [Abbildung 12](#) dargestellt, gibt es entlang der gesamten Textilwertschöpfungskette eine Vielzahl von Möglichkeiten, Rezyklate aus Post-Consumer-Textilien im Kreislauf zu führen, sodass nur geringe

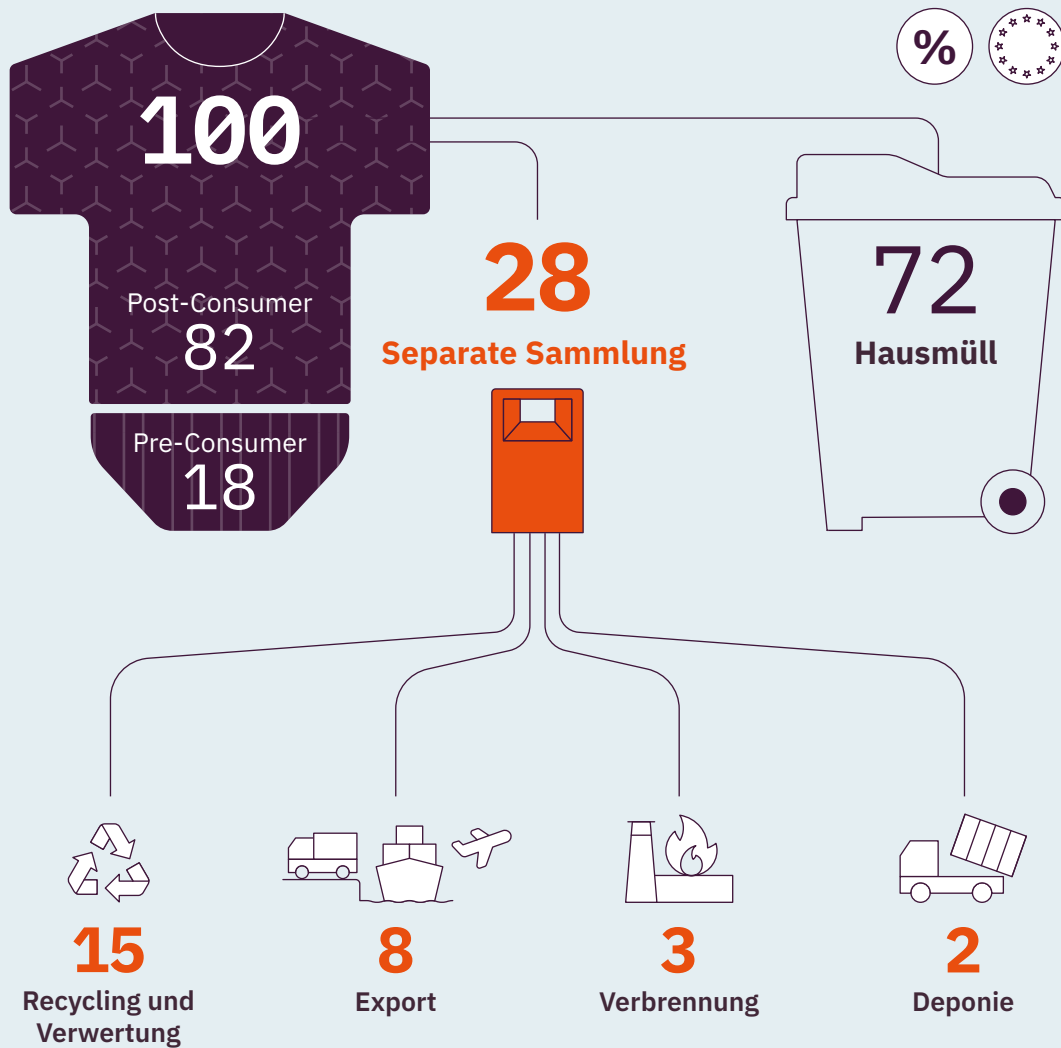


Abbildung 6: Aktuelle Daten für Textilabfallaufkommen, -sammlung und -verwertung in der EU in %⁵³.

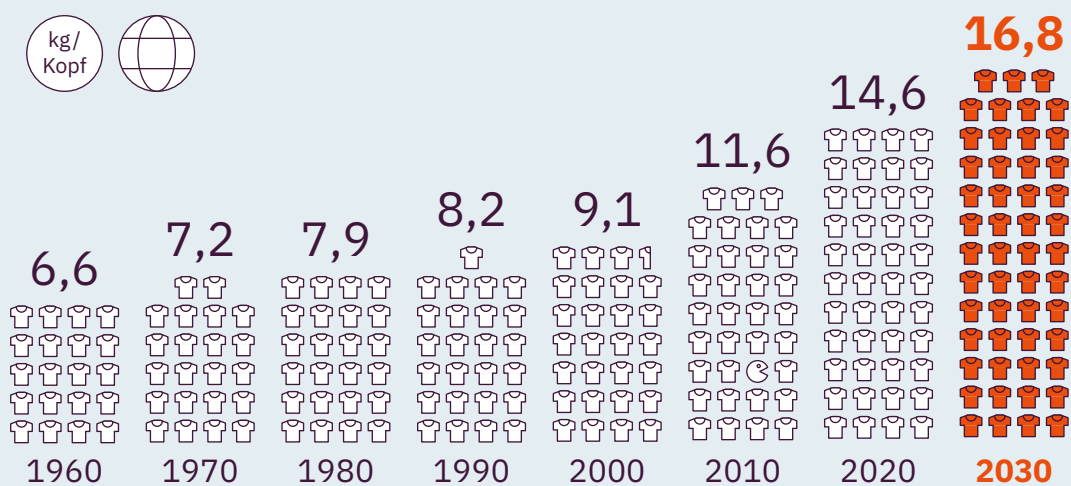


Abbildung 7: Entwicklung Produktion der wichtigsten Fasertypen weltweit – jährliche Anteile in kg/Kopf⁵³.

Mengen außerhalb des Kreislaufs rezykliert oder energetisch genutzt werden müssen. Der Artikel bietet eine gute Literatursammlung zu aktuellen Stoffströmen und neuen Entwicklungen im Textilrecycling, bezieht sich bei Letzteren jedoch auf den Stand der Forschung.

2.2.3.3

Technische Aspekte und Akteure

Zur Identifizierung der wichtigen Akteure wurden zusätzlich die Tagungsbände der Konferenz re4tex^{100–105} herangezogen, die jedes zweite Mal einen umfassend aufgearbeiteten Rückblick auf die ITMA desselben Jahres enthalten. Die ITMA ist die größte europäische Messe der Textil- und Bekleidungsindustrie. Sie findet alle vier Jahre statt, und Textilmaschinenhersteller aus der ganzen Welt nehmen daran teil. Um einen Eindruck von der Marktentwicklung zu erhalten, erfolgte schließlich ein statistischer Vergleich der ITMA-Rückblicke von 2015¹²³ und 2023¹²⁴.

Die statistische Auswertung der ITMA in [Abbildung 13](#) zeigt deutlich mehrere Unterschiede, die allerdings zum Teil auf externe Faktoren zurückzuführen sind: mit 1 691 Ausstellern im Jahr 2015 und 1 709 Ausstellern im Jahr 2023 waren die verglichenen Messen etwa gleich groß. Der Schwerpunkt des Rückblicks wurde jedoch von Herstellern für Textilrecycling auf Hersteller für Vliesstofftechnologien ausgeweitet, sodass der Anteil des Textilrecyclings im Rückblick 2023 mit 12 Firmen (statt 18 im Jahr 2015) kleiner ausfiel. Insgesamt waren 2015 18 Firmen mit insgesamt 31 Anlagen/Komponenten für das Textil-

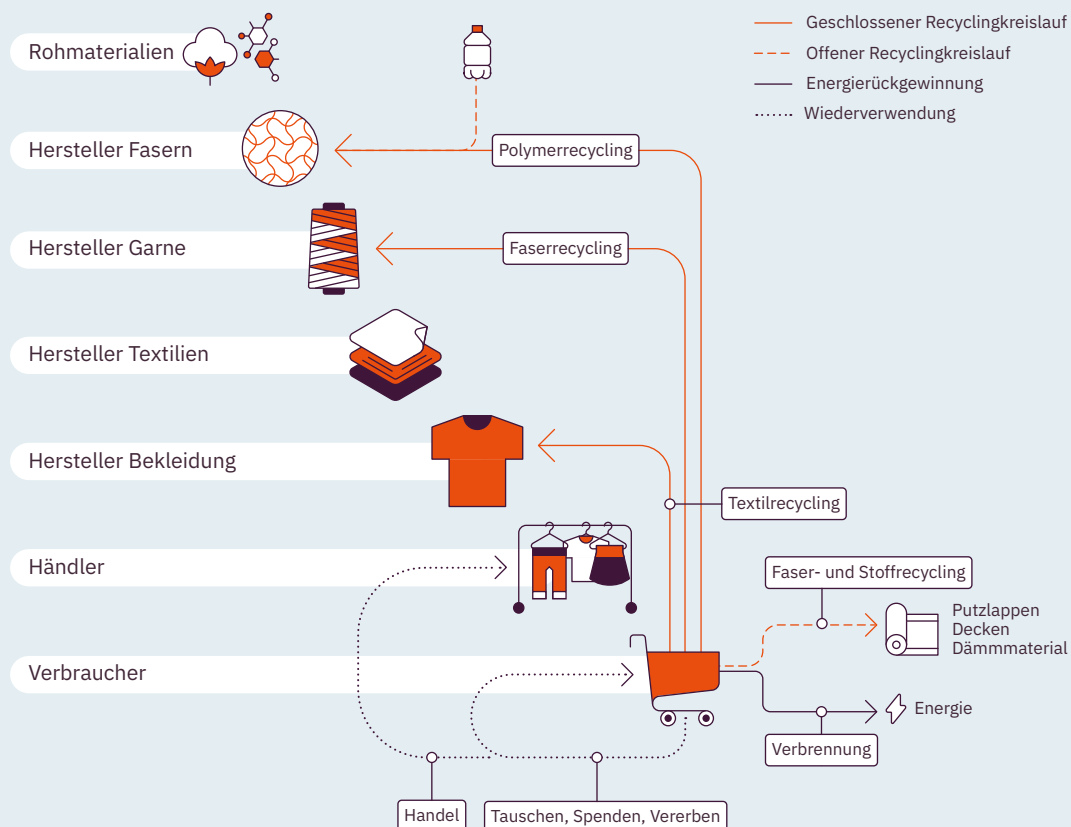
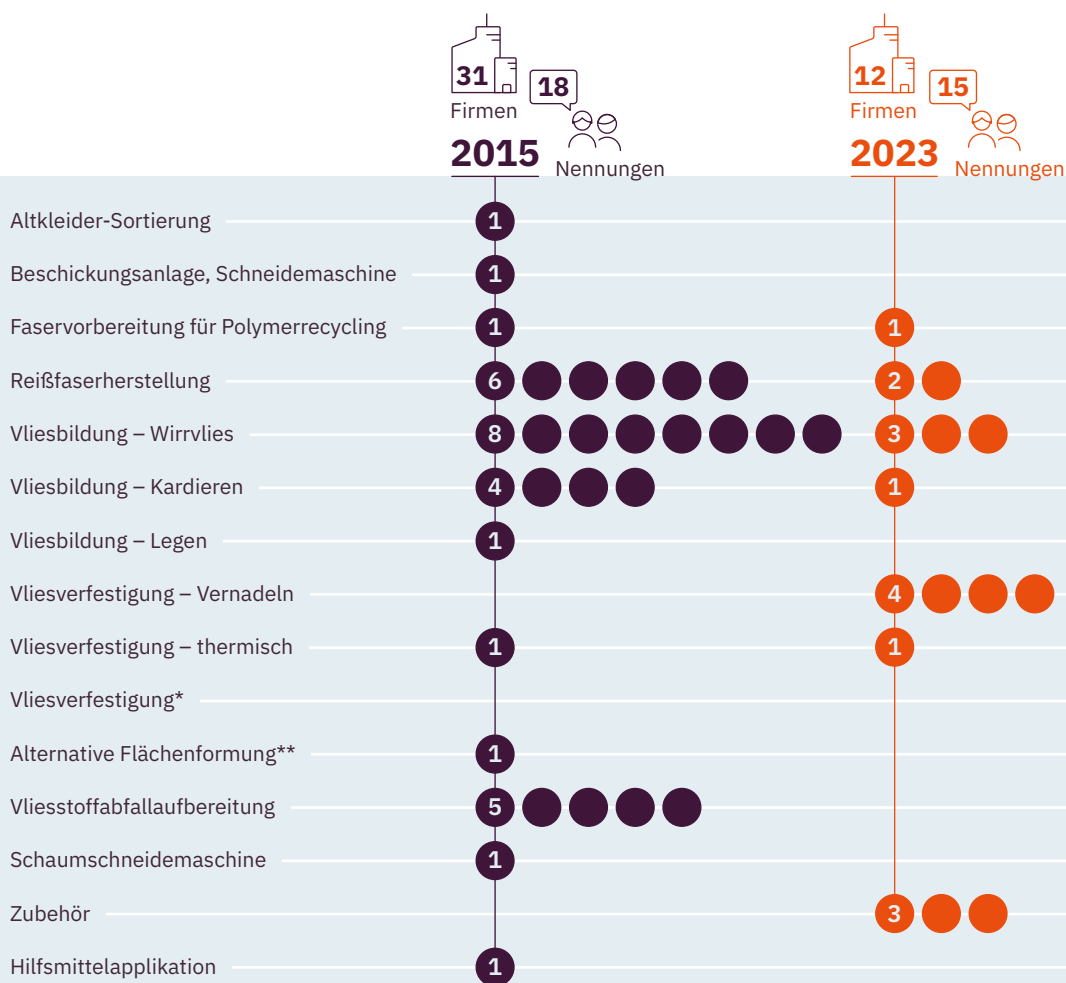


Abbildung 8: Generelle Routen des Textilrecyclings im Bereich mechanisches und (bio)chemisches Recycling⁵

recycling präsent; in 2023 waren es 12 Firmen mit 15 Anlagen/Komponenten. Der wichtigste Unterschied ist, dass im Jahr 2015 ausschließlich das mechanische Recycling adressiert wurde. Als thermisches Verfahren wurde lediglich die thermische Vliesstoffverfestigung genannt; chemisches Recycling wurde hingegen nicht präsentiert. Dagegen war in 2023 das thermische Recycling mit der Faservorbereitung für Polymerrecycling (EREMA) präsent; während das chemische Recycling wiederum nicht präsentiert wurde. Die ITMA spiegelt somit auch den aktuellen Markt wider, der nach wie vor vom mechanischen Textilrecycling dominiert wird.

Die Sammlung ist nach Technologiefeldern gegliedert und umfasst mehrfache Nennungen einzelner Anlagenbauer in verschiedenen Technologiefeldern. Dies betrifft insgesamt 46 Nennungen:

- **Sortierung & Beschickung:** 3 Nennungen (6,5 %)
- **Reißfaserherstellung:** 6 Nennungen (13,0 %)
- **Vliesbildung:** 14 Nennungen (30,4 %)
- **Vliesverfestigung:** 11 Nennungen (23,9 %)
- **Abfallaufbereitung:** 5 Nennungen (10,9 %)
- **Zubehör, Hilfsaggregate:** 6 Nennungen (13,0 %)
- **Faservorbereit. f. Polymerrecycling:** 1 Nennung (2,1 %)



*Pulverimprägnieranlage **Präzisions-Streuaggregat

Abbildung 9: Auswertung der ITMA-Rückblicke der re4tex 2015¹²³ und 2023¹²⁴.

Auch hier wird die Dominanz des mechanischen Recyclings noch einmal deutlich: Die Bereiche von der Reißfaserherstellung bis zur Vliesverfestigung machen zusammen 67,3 %, also rund zwei Drittel, der Nennungen aus.

Die Technologien des thermischen und chemischen Textilrecyclings werden parallel zu den umfangreichen aktuellen Forschungsarbeiten bereits über das Pilotstadium hinaus weiterentwickelt. Als Anlagentechnik stammen sie überwiegend aus der chemischen Industrie. Damit werden sie durch die oben genannten Quellen (zumindest noch) nicht gut abgedeckt. Einen guten Überblick darüber liefert das Whitepaper von Stubbe et al 2024¹⁰⁶.

In  Abbildung 14 ist die statistische Auswertung der im Whitepaper¹⁰⁶ genannten Akteure dargestellt. Hierbei handelt es sich sowohl um Anlagenbauer als auch um am Recyclingmarkt aktive Anlagenbetreiber. Die Sammlung umfasst auch Akteure des mechanischen Textilrecyclings sowie der Vorstufen dazu, ist für diesen Bereich jedoch unvollständig.

Dies ist derzeit die beste verfügbare Auflistung der Akteure im Anlagenbau für das thermische und chemische Textilrecycling. Sie umfasst 38 Akteure, die jeweils nur für ein Technologiefeld genannt werden. Nach Bereichen gegliedert sind dies:

- **Sortierung:** 11 Akteure (28,9 %)
- **Mechanisches Recycling:** 3 Akteure (7,9 %)
- **Thermisches Recycling:** 11 Akteure (28,9 %)
- **Chemisches Recycling:** 13 Akteure (34,2 %)

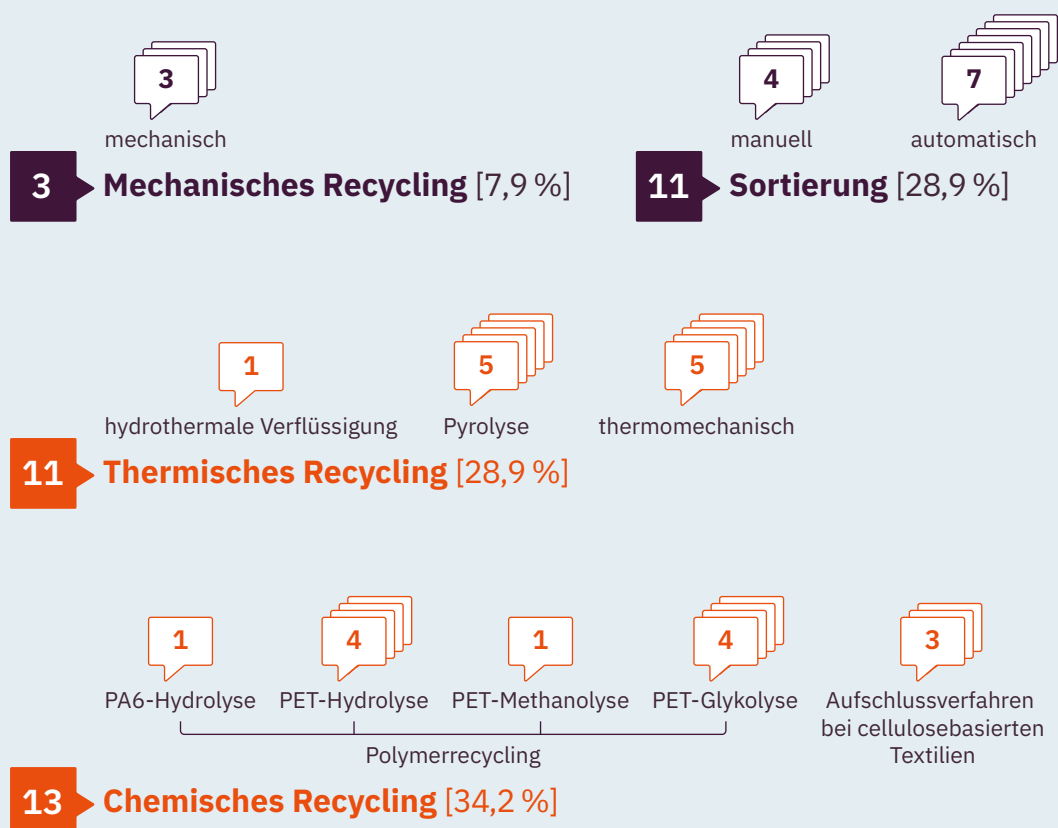


Abbildung 10: Statistische Auswertung Anlagenbauer aus Whitepaper Stubbe et al. 2024¹⁰⁶,

Damit sind über 60 % der Firmen aus den „neuen“ Technologiebereichen Thermisches und Chemisches Textilrecycling enthalten.

Im Bereich des chemischen Textilrecyclings sind 13 Akteure erfasst. Davon sind drei für das Polymerrecycling von Cellulose im Pulpingprozess, einer für das PA6-Recycling im Hydrolyseprozess und neun für das PET-Recycling in verschiedenen Prozessen (Glycolyse, Hydrolyse und Methanolyse) gelistet. Dies spiegelt auf der Inputseite in etwa die Zusammensetzung des Alttextilmarkts wider: Baumwolle (als Cellulosequelle) und PET sowie deren Mischungen sind die mit Abstand größten Bestandteile des Alttextilstroms.

Auch hier gilt: es handelt sich überwiegend um kleine Firmen oder Start-ups, wie die Ergebnisse der Interviews zeigen. Eine weitere auffällige Diskrepanz zu den Ergebnissen der Interviews sowie der Recherche in Wissenschaftsdatenbanken und Factiva ist das Fehlen der derzeit größten Akteure Södra/Lenzing und Circulose (ehemals Renewcell), die den Pulpingprozess bereits im kleinen Industriemaßstab betreiben  Interviews.

Insgesamt liefert die Recherche in den beschriebenen Quellen einen guten Überblick über die aktuell aktiven Akteure im Textilrecyclingsektor. In einem dynamischen Markt mit vielen kleinen und neuen Akteuren kann allerdings keine der verwendeten Quellen als vollständig gelten. Eine ebenfalls unvollständige weitere Quelle ist beispielsweise die Studie von Dahlbom et al.²⁶.

3

Interviews

Die Interviews umfassten einerseits Befragungen von Experten¹ bzw. Vertretern aus der Forschung und andererseits von Vertretern der Industrie. Durch diese Aufteilung war es möglich, einerseits das branchenübergreifende Wissen der Experten und andererseits das spezifische Wissen der Industrieteilnehmer über ihr jeweiliges Umfeld innerhalb der Wertschöpfungskette abzufragen. Gleichzeitig war es notwendig, für die beiden Interviewserien unterschiedliche Fragenkataloge zu erstellen, um die verschiedenen Aspekte gezielt ansprechen zu können.

Der Aufbau, die Durchführung und die Auswertung der Interviews sind in den nachfolgenden Abschnitten jeweils separat beschrieben.

3.1

Planung & Struktur

Entsprechend dem Auftrag sollten ca. 6 Experten und ca. 18 Firmen interviewt werden. Der Aufbau der Fragenkataloge sowie die Durchführung der Interviews sind nachfolgend für die Experten- und die Industrieinterviews in separaten Abschnitten beschrieben.

3.1.1

Aufbau und Durchführung der Experteninterviews

Die Experteninterviews dienten der Erfassung von branchenübergreifendem und die gesamte Wertschöpfungskette umfassenden Wissens. Entsprechend wurde der Fragebogen auf dieses Ziel zugeschnitten. Zusätzlich wurde abgefragt, welche weiteren Interviewpartner für diese Studie relevant sein könnten. Außerdem bestand die Möglichkeit, weitere Stichworte ohne Zusammenhang mit den Fragen zu nennen. Das Interview gliedert sich damit in folgende Fragenblöcke:

- Stoffströme
- Technologien
- Recycling
- Allgemeine Abschlussfragen: Dieser Fragenkatalog wurde in allen Experteninterviews verwendet. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 3.2.1 aufgeführt und bewertet.

1 In diesem Bericht werden die Begriffe „Experten, Vertreter, Teilnehmer etc.“ verwendet, um alle Interviewpartner – unabhängig von ihrer Geschlechtsidentität (männlich, weiblich, divers) – zu berücksichtigen.

3.1.2

Aufbau und Durchführung der Industrieinterviews

Mithilfe der Industrieinterviews sollte das spezifische Wissen der Befragten über ihr jeweiliges Umfeld innerhalb der Wertschöpfungskette erfasst werden. Durch die Auswahl der Interviewpartner wurde die gesamte Wertschöpfungskette des Textilrecyclings in den Interviews möglichst vollständig abgebildet. Der Fragebogen wurde auf dieses Ziel zugeschnitten. Zusätzlich wurde abgefragt, welche weiteren Interviewpartner für diese Studie wichtig sein könnten. Außerdem bestand die Möglichkeit, weitere Stichworte ohne Zusammenhang mit den Fragen zu nennen.

Bei Industrieinterviews mit Partnern im nicht deutschsprachigen Raum kam eine englische Übersetzung des Fragenkatalogs zum Einsatz.

Das Interview gliedert sich damit in folgende Fragenblöcke:

- Einordnung des Interviewpartners
- Erfassung der Marktsegmente
- Eigene und allgemeine Einordnung
- Allgemeine Fragen
- Allgemeine Abschlussfragen

Dieser Fragenkatalog wurde in allen Industrieinterviews verwendet. Da beide Sprachversionen inhaltlich identisch aufgebaut sind, ist eine gemeinsame Auswertung möglich. Die Ergebnisse dieser Interviews sind in Abschnitt 3.2.2 aufgeführt und bewertet.

3.2

Auswertung der Interviews

Aufgrund der unterschiedlichen Inhalte werden die Interviews von Experten und aus der Industrie separat nach einheitlichen Kriterien ausgewertet.

Diese Kriterien umfassen:

- Antwortquoten je Frage
- Statistische Auswertung der tabellarisch erfassten Daten
- Statistische Auswertung bei weitgehend einheitlich beantworteten Fragen
- Eingehende Bewertung im Fließtext bei uneinheitlich beantworteten Fragen

Abschließend erfolgt die Zusammenfassung der Interviewergebnisse in Abschnitt 3.3.

3.2.1

Experteninterviews

Zur Durchführung der Experteninterviews wurden acht Experten angefragt. Eine Anfrage blieb mehrfach unbeantwortet, sieben Interviews konnten wie geplant durchgeführt werden. Die Interviewpartner kamen aus folgenden Bereichen:

- **Textilforschungsinstitut** Expertise in Stapelfasern, Weberei, Klassifizierung recycelter Fasern
- **Textilforschungsinstitut** Expertise in Textilrecycling, recyclinggerechtes Design, Vliesstoffe
- **Textilforschungsinstitut** Expertise in mechanischem Textilrecycling, Rohstoffklassifizierung, Prozessoptimierung
- **Hochschule** Expertise in Textilkreislauf, Materialstromanalysen, Design-for-Circularity
- **Textilverband** Expertise in Textilrecycling, Materialströmen, Marktakteuren
- **Hochschule** Expertise in Textilrecycling, Textilkreislauf, Vliesstoffverfahren mit Rezyklaten
- **Textilverband** Expertise in Kreislaufsystemen, Nachhaltigkeit, recyclinggerechter Textilproduktion, Marktakteuren

Die Auswahl der interviewten Experten deckt die zentralen Bereiche des Textilrecyclings gut ab. Die Details können der Auswertung der Fragen entnommen werden.

In den Experteninterviews ist, wie erwartet, eine hohe Bereitschaft der Interviewten zur Informationsvermittlung erkennbar. Die einleitenden Fragen 1–8 zu Stoffströmen im Textilrecycling wurden überwiegend zu 100 % beantwortet; die Fragen 9–15 zu Sortierung und Mechanischem Recycling überwiegend zu 71–100 %. Die durchschnittliche Antwortquote aller Fragen betrug 85 %. Auf dieser Grundlage kann eine valide Auswertung der Interviews erfolgen.

- Wie groß ist das Gesamtaufkommen an Alttextilien? Welcher Anteil davon wird in der Sammlung erfasst? Welche Info-Quellen kennen Sie dazu und wie gut schätzen Sie diese ein?

Auf die Fragen verwiesen die Befragten hauptsächlich auf jüngere Studien/Literatur zum Thema. Da ein aktueller Überblick zu den Stoffströmen bereits in Abschnitt 2.2.3.2 zu finden ist, wird an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung der einzelnen Zahlen verzichtet. Als Ergänzung seien hier lediglich beispielhaft einige Antworten genannt:

„(Alttextilaufkommen) global ca. 92 Mt/a, davon 15 %–25 % in Sammlung“
„nur Produktionsabfälle in D: 284 kt/a“
„Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference (ADD-ITC):
1 % werden recycelt“

Daneben wurde an dieser Stelle in den Interviews bereits mehrfach auf die Gefahren durch die neue Abfallverordnung der EU hingewiesen. Diese beschneide bestehende Märkte („ab 2025 keine Exporte von Alttextilien mehr“), und vergrößere gleichzeitig das Rohstoffaufkommen durch die Pflicht zur getrennten Sammlung von Alttextilien (dadurch schlechtere durchschnittliche Qualität). Gleichzeitig würden keine neuen Absatzmärkte für die Akteure geöffnet.

2. Unterscheidet sich Deutschland im Textilrecycling vom Rest der EU/Welt?

Die Frage wurde von den Teilnehmern klar mit „ja“ beantwortet. Besonders herausgestellt wurden dabei folgende Unterschiede:

„Sammlung und Sortierung funktionieren in D recht gut“
„unterschiedliche Sammelsysteme in D und EU“
„andere Länder sind im chemischen Recycling weiter“

Insgesamt waren die Befragten der Ansicht, dass Deutschland ein großes Potenzial bzw. einen großen Markt für das Textilrecycling bietet, in Anbetracht der neuen EU-Richtlinie jedoch ergänzendes nationales Recht notwendig ist. Insbesondere die Getrenntsammlungspflicht sei ohne ein EPR nicht sinnvoll. Als positives Beispiel wurden die Niederlande genannt.

3. Wer sind die größten Akteure im Bereich Textilrecycling?



Bei der Frage waren sich die Befragten ebenfalls weitgehend einig. Vorrangig wurden Akteure des mechanischen Textilrecyclings genannt.

Als Grund für das Überwiegen dieser Akteure wurde genannt, dass dieses Verfahren so weit entwickelt sei, dass sich Anlagen skalierbar bauen lassen. Im Gegensatz dazu sei das Chemische Recycling noch nicht skalierbar, sondern „ca. 6–8 Jahre von Full Scale entfernt“. In diesem Zusammenhang wurde Södra als einziger industrieller Akteur erwähnt, der derzeit allerdings lediglich Baumwolle recycelt. Enzymatisches Textilrecycling erfolge derzeit „nur im allergeringsten Maßstab“.

4. Gab es in den letzten Jahren Marktkonzentrationen entlang der Stoffströme? Prognose?



Die Frage wurde nicht einheitlich beantwortet: vier Teilnehmer (57 %) sehen Konzentrationen im Markt; drei weitere (43 %) sehen keine Konzentration. Dies unterscheidet sich signifikant von den Antworten der Befragten aus der Industrie [Abschnitt 3.2.2](#), die in ihrer Praxis einheitlich keine Konzentration im Markt sehen.

Der Grund für diesen Unterschied dürfte hauptsächlich im unterschiedlichen Fokus der befragten Gruppen liegen. Die Befragten aus der Industrie konzentrieren sich auf ihr eigenes Marktsegment und die dort engagierten anderen Akteure. Die Experten haben dagegen oft den weltweiten Gesamtsektor des Textilrecyclings in den Fokus genommen. Dies spiegelt sich vor allem in den bejahenden Antworten wider. Diese beziehen sich u. a. auf die „Textilbranche in Asien“ oder die „Konzentration bei Sammlern“ und auf die Beobachtung, dass sich das Textilrecycling (weltweit) durch die Tendenz zu weniger, aber größeren Firmen weiter auf „auf PES, CO, PA im großen Stil“ beschränke.

Die Gegenmeinung bezieht sich, ähnlich wie der Fokus der befragten Personen aus der Industrie, eher auf den europäischen Markt. Sie wird damit begründet, dass beispielsweise „mehr Feedstock verfügbar (ist), als verarbeitet werden kann“ und im Markt „eher Dekonzentration als Konzentration“ erfolge. Dies wird dadurch gestützt, dass sich im Markt abseits des mechanischen Recyclings eher Start-ups mit unterschiedlichen Materialkombinationen etablieren (Beispiel: Eeden).

5. Welche Rücknahmesysteme sind bekannt?



Die Frage bezieht sich auf den Bereich Sammlung/Rücknahme und wurde von den Teilnehmenden individuell beantwortet. Drei der Teilnehmer betonten ausdrücklich, dass die Sammlung in Deutschland durch Altkleidercontainer dominiert wird. Die Anfänge der weiteren heutigen Rücknahmesysteme gehen auf das „blaue Viereck“ in den 1990er Jahren zurück. Heute sind dort nach Ansicht der Teilnehmenden im Wesentlichen Handelsunternehmen und Textilmarken aktiv.

Die Befragten sind sich weitgehend einig, dass die Rücknahmesysteme der Marken im Gegensatz zur Mietwäsche wenig zum Stoffstrom des Textilrecyclings beitragen. Aussagen dazu sind:

- „eher für gutes Gewissen als für wirkliches Recycling“
- „allgemein wenig Erfolg ... fraglich, ob wirklich Volumina gegeben sind“
- „Eher Marketingaspekt. Eher für Second Hand als für Recycling“
- „haben es auf der Homepage“
- „fraglich, ob es wirklich gemacht wird“

Das lässt den Schluss zu, dass zumindest im Post-Consumer-Bereich derzeit lediglich das Textilrecycling mit öffentlicher Sammlung als funktionierende Wertschöpfungskette am Markt etabliert ist.

6. Prognosen zur Rücknahme? Gründe?

Sechs der Teilnehmer (86 %) haben geantwortet. Als Haupthemmnis für eine positive Entwicklung nannten vier der Befragten (57 %; 67 % der Antworten) die seit 2025 gültige neue EU-Richtlinie bzw. die generelle Notwendigkeit politischer Rahmenbedingungen, die eine Einschätzung der Entwicklung kaum zulassen. Positiv wird lediglich der B2B-Markt im Bereich Post-Industrial gesehen.

Beispiele sind:

- „zur Zeit extremer Preisdruck, Verkauf bricht ein“
- „es könnte wohl mehr werden“
- „B2B läuft, wird weiter professionalisiert“
- „politische Rahmenbedingungen nötig ... 3€-T-Shirts sind nicht mal für Putzlappen geeignet“

Dies lässt ebenfalls den Schluss zu, dass ein nationales EPR notwendig ist, um die bestehenden Strukturen zu erhalten und das Textilrecycling insgesamt auf eine solide wirtschaftliche Basis zu stellen.

7. Haben Sie auch Informationen zu Schuhen & Matratzen? (Art der Sammlung, Recyclingmöglichkeiten)

Die Frage zielte auf die nicht klassisch textilen Bestandteile des Textilrecyclings. Sechs der Befragten hatten zwar Informationen, jedoch alle nach eigener Aussage nur sehr wenige.

Die Aussagen umfassten, dass zumindest in Deutschland und der Schweiz für Schuhe dieselben Sammlungswege wie für das reguläre Textilrecycling genutzt werden. Matratzen werden dagegen in Deutschland über Sperrmüll oder den Handel dem Recycling zugeführt.

Mehrere Teilnehmer wiesen darauf hin, dass (aktuell) Schuhe eine „wüste Materialmischung“ darstellen und bestenfalls als Shreddergut zu Füllstoffen downgecycelt werden können („absehbar nicht recyclingfähig“).

Auf Basis dieser unvollständigen Datenlage ist eine abschließende Bewertung der Stoffströme im Schuh- und Matratzenrecycling nicht möglich.

Die Fragen im Fragenblock Sortierung wurden umfassend beantwortet.

8. Manuelle Sortierung: Nach welchen Kategorien wird sortiert? (Stand der Technik/Prognose)

Bei der Frage unterscheiden sich die Antworten zwar je nach Art der betrachteten Sortierer, aber die Teilnehmer sind sich im Prinzip einig. Dabei wurde auffallend häufig die Sortierung von SOEX² beschrieben, die nach bis zu 300 Kriterien erfolgte. Der Sortiervorgang läuft dabei immer mit einer manuellen Vorsortierung, falls Kleidung für den Verkauf als Second-Hand gewonnen werden soll. Die weitere Beschreibung gilt wieder generell für die Sortierung.

Diese auch als „1. Qualität“ bezeichnete Fraktion für den Re-use muss die Bedingungen „intakt“ und „tragbar“ und ggf. „modisch“ erfüllen. Sie wird außerdem nach Material, Farbe und Saisonartikel kategorisiert. Die Prognose der Befragten dazu ist, dass das Abtrennen dieser ersten Fraktion absehbar manuell bleiben wird.

Die „2. Qualität“ ist dann für die Verwertung durch Recycling vorgesehen und wird nach Farbe und Material kategorisiert. In dieser Stufe kommen überwiegend automatische Systeme zum Einsatz. Für die Kategorisierung nach Farbe kommen Kamerasysteme zum Einsatz, während die Materialart häufig durch den Einsatz von NIR-Sensoren identifiziert wird. Mehrere der Befragten berichteten auch über den testweisen Einsatz von KI in der Interpretation der Sensorsignale. Generell wird dafür ein großes Potenzial gesehen.

Die verbleibende „3. Qualität“ ist der Abfall, der soweit möglich anderen, nicht textilen Recyclingwegen zugeführt wird.

Als Probleme in der Sortierung wurden u. a. benannt:

- Quantifizierung der Bestandteile von Mischtextilien (Unterschiede außen/innen), mehr als drei Komponenten etc.
- Etiketten sind oft falsch und gleichzeitig auch Störstoff im Prozess. Die Lage wird evtl. noch verschärft durch digitalen Produktpass, neue Textilkennzeichenverordnung und ggf. zukünftig RFID-Etiketten
- Das manuelle Sortieren wird ökonomisch immer kritischer: Lohnsteigerungen und Rückgang Erfahrung

9. Automatische Sortierung: Welche Verfahren kommen zum Einsatz? Erfolgt schon Einsatz von KI?

Die Frage wurde im Wesentlichen bereits bei Frage 8 beantwortet.

Die Antworten beschreiben zusammengefasst:

- automatische Sortierung erfolgt für Reißerei
- Standard ist NIR zur Materialbestimmung und RGB (sichtbares Licht) zur Farbsortierung
- KI wird bereits in Pilotanlagen (außerhalb von DE) genutzt

10. Was sind typische Probleme in der Sortierung?

Mit der Frage wurde dieser Fragenblock abgeschlossen. Die Experten haben eine Reihe von Problemen benannt, die hier in absteigender Reihenfolge der Häufigkeit aufgelistet sind:

- Mischtextilien (schlechte Identifizierbarkeit und Quantifizierbarkeit der Komponenten; schlechtere Recyclingmöglichkeiten)
- Elastan als Störkomponente in der Wiederverwendung
- Etiketten sind im zweistelligen Prozentbereich falsch oder fehlen
- Linie ist personalintensiv
- Multilayer, PTFE oder mit carbon black gefärbtes wird nicht/falsch erkannt; Färbechemikalien stören Erkennung

Zusammengefasst ist die Sortierung damit ein vielstufig aufgebautes System, das Rezyklatfraktionen genau angepasst an die Bedürfnisse des Kunden liefern kann. Dies muss jedoch von allen Beteiligten beachtet werden, um die oben benannten Probleme zu vermeiden.

Das Thema wird deshalb im Folgenden detaillierter betrachtet: Der nächste Fragenblock dreht sich um den Umgang mit Mischungen sowie mit Fremd- und Störstoffen im Prozess.

11. Wie ist der Umgang mit Mischtextilien?

Die Beantwortung der Frage lässt sich vereinfacht mit Vermeidung zusammenfassen. Alle Experten sind sich einig, dass die Verarbeiter, wenn möglich, lieber sortenreine Chargen als Mischungen verarbeiten. Dies entspricht jedoch nicht dem realen Rezyklatstrom, weshalb die Verarbeitung der häufigsten Mischungen Standard ist. Dazu zählen PES/CO- und PA/CO-Mischungen in verschiedenen Mischungsverhältnissen. Dabei ist zu beachten, dass sich das Mischungsverhältnis im Reißprozess aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens der Materialien (unterschiedliche Staubverluste) ändert. Dies kann durch die spätere Zugabe von Virginmaterial kompensiert werden.

12. Wie ist der Umgang mit Funktionstextilen/Ausrüstung? (Outdoor)

In der Frage sind sich die Experten einig: es „*ist momentan das größte Problem*“. Dementsprechend reicht die Umgangsweise von „*aussortieren*“ bis „*Wird nicht gemacht*“. Gründe dafür sind die schlecht trennbaren Materialmischungen, die ggf. sogar REACH-Probleme verursachen könnten und eine Öko-Tex-Zertifizierung verhindern, sowie die vergleichsweise geringen Mengen.

Es wird jedoch ein gewisses Potenzial für die Zukunft gesehen:

- mehrere Experten betonen das große Potenzial von Design for Recycling in Kombination mit einem eigenen Sammelsystem
- Trennung durch Depolymerisation des PES, um damit wenigstens die Hauptkomponente wieder nutzen zu können

Diese Möglichkeiten kommen trotz hoher Kosten nach Ansicht der Experten in Frage, weil Outdoortextilien dem Sportbereich zugerechnet werden, zum höherpreisigen Segment gehören, und weil hier aufgrund der öffentlichen Aufmerksamkeit für Rezyklate mit einer höheren Marktakzeptanz gerechnet werden kann:

„eine Frage der Zielgruppen. Bei Sporttextilien legt diese Wert auf Nachhaltigkeit und ist auch bereit u. U. mehr Geld dafür auszugeben.“

13. Wie ist der Umgang mit Elastan o. ä.?



Auch zu dieser Frage sind sich die Experten einig. Es liegt in Alttextilien mit bis zu 25 % vor, aber nur Gehalte von 2–5 % sind recycelbar. Elastan verursacht weniger Probleme beim Reißen als in der nachgeschalteten Weiterverarbeitung. Dementsprechend könnten im mechanischen Recycling bis zu 10 % Elastan verarbeitet werden, in der Praxis werden jedoch nur Anteile bis max. 5 % geduldet. Die höchsten Anforderungen werden an Rezyklate für das chemische Zelluloserecycling gestellt. Konzentrationen ab 1 % verhindern den Cellulose-Pulp-Prozess (verstopfen die Filter), hierzu auch die entsprechende Frage der Industrieinterviews in Abschnitt 3.2.2.

14. Wie ist der Umgang mit Fremdbestandteilen (Knöpfe etc.)?



Die Frage adressiert ein nach Meinung der Experten industriell gelöstes Problem. Beispiele sind:

- „lässt sich alles shreddern, Fremdbestandteile fallen durch Rütteln raus ... kein großes Problem“*
- „beim groben Vorreißen wird es rausgereinigt“*
- „Separation im Luftstrom, mittels Entpitzung, Zyklone, Klopfwolf und/oder Stufenreiniger“*
- „Etablierte Technik für Entfernung von Nähten Labels etc: TrimClean“*
- „maschinell gelöst (Luft, Fliehkraft) ... Reinigungsgrad 99,7 %“*

Dies deckt sich auch mit der Ansicht der in Abschnitt 3.2.2 befragten Industrievertreter.

15. Auf die Frage zum Stand der technischen Reife der Verfahren



wurden sechs Antworten gegeben (86 %).

Für eine Bewertung gibt es in den einzelnen Bereichen – wie in Abbildung 15 aufgelistet – genügend Antworten. Die Antworten zur Bewertung von Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit sind in der Regel „ja“ oder „neutral“ und wurden deshalb lediglich als Summe gezählt, aber nicht weiter spezifiziert.

Die Bereiche von 1 (Textile Flächen) bis 3 (Auflösung zu Garn/Faser) sowie 6 (Thermische Verwertung) sind nach Ansicht der Interviewpartner im Industriemaßstab etabliert. In den Bereichen 4 (Polymer schmelzen, Lösen) und 5 (Monomer Depolymerisation) des Polymerrecyclings gibt es hingegen lediglich erste Industrieanlagen z. B. bei Södra.

Die Wirtschaftlichkeit der Prozesse wird von den Experten mehrfach als nur knapp gegeben erwähnt, was mit der Notwendigkeit einer EPR korreliert. Aussagen dazu sind beispielsweise:

- bezogen auf 1 (Textile Flächen):
„ist kleineres Minus als thermische Verwertung“
- bezogen auf 3 (Auflösung zu Garn/Faser):
„Wirtschaftlichkeit variiert, Umkämpfter Markt“

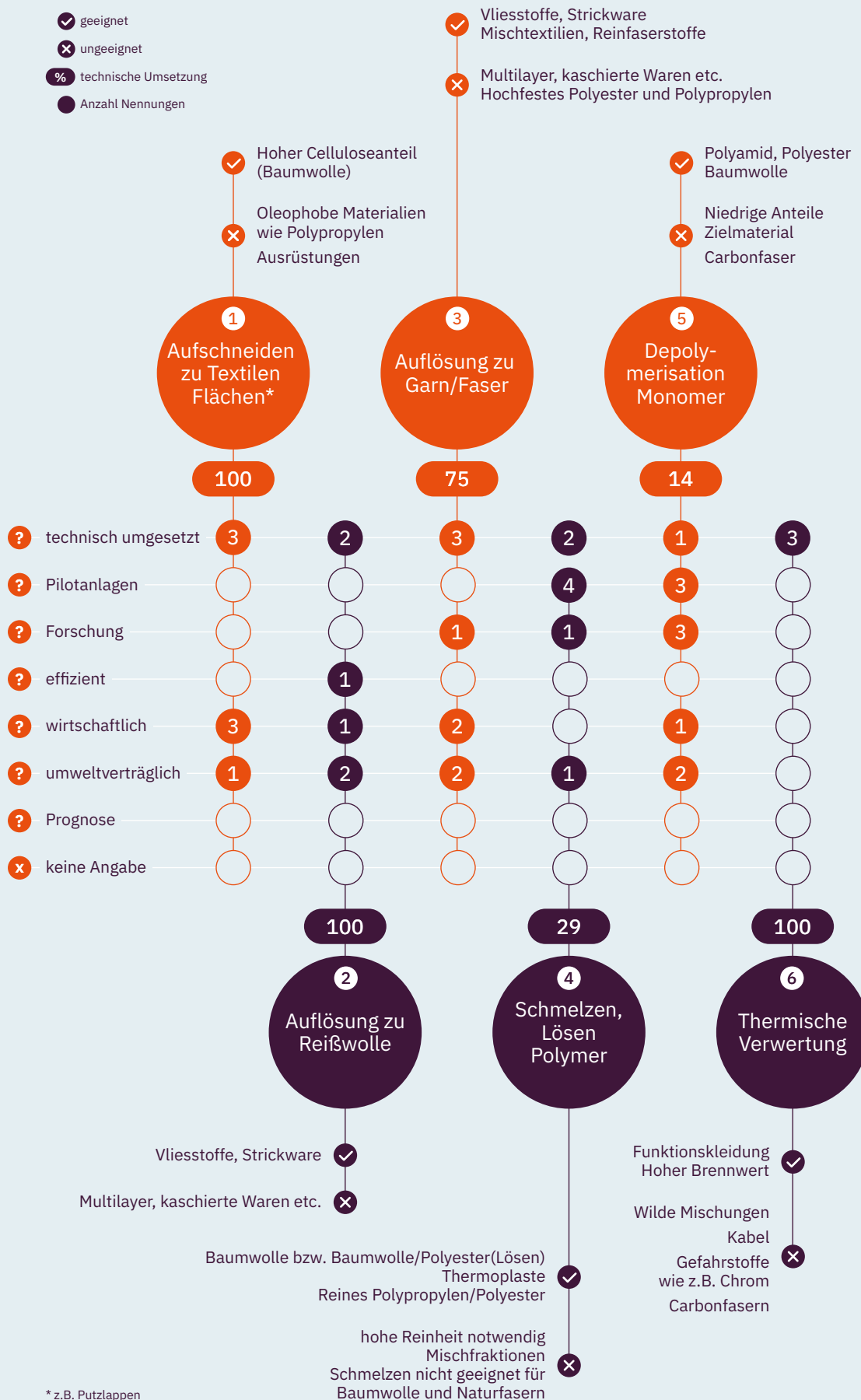


Abbildung 11: Einschätzung der technischen Reife durch die befragten Experten sowie Eignungsbereiche der verschiedenen Recyclingverfahren.

Damit ist das mechanische Recycling derzeit das einzige in großem Maßstab praktizierte Verfahren im Textilrecycling, wie die befragten Experten mehrheitlich angeben. Dies deckt sich auch mit der Ansicht der Industrievertreter Abschnitt 3.2.2.

16. Was passiert mit den Rezyklaten? Nach den jeweiligen Verfahren?



Die Frage wurde von lediglich vier der Befragten beantwortet. Dies kann als Indiz dafür gesehen werden, dass die Akteure am Markt nur wenige öffentliche Informationen zur Struktur ihrer Kunden bereitstellen. Eine der Aussagen lautete dementsprechend

„es gibt scheinbar keinen großen Markt“.

Im Detail wurde die Vliesstoffindustrie als überwiegender Abnehmer (bis zu 90 %) der Rezyklate genannt, gefolgt von Spinnereien (Garnherstellung) als deutlich kleinerem Abnehmer.

Dies entspricht in etwa dem Ergebnis der Industriebefragung.

17. Welche Recyclingverfahren sind für welche Produkte/Fasern/Mischungen besonders geeignet/nicht geeignet?



Auch diese Frage wurde von den Teilnehmern spezifisch beantwortet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 zusammengefasst.

Die Abbildung bietet einen komprimierten Überblick über die Eignung bzw. Nichteignung der verschiedenen Recyclingverfahren für unterschiedliche Rezyklate. Die Teilnehmer haben die Einstufung nicht nach identischen Kriterien vorgenommen. Im Wesentlichen wurde entweder nach Materialart oder Produktart klassifiziert. Soweit beide Klassifizierungen in einer Einstufung vorkamen, wurden sie gleichberechtigt genannt.

Die Einstufung in die Verfahren spiegelt die bereits zu den vorherigen Fragen gemachten Aussagen wider. So wird Funktionskleidung beispielsweise ausschließlich als für die thermische Verwertung geeignet eingestuft. Baumwolle ist dagegen für praktisch alles außer Polymerschmelze geeignet.

18. Welche Recyclingverfahren haben aktuell die größte Bedeutung? Prognose?



Auf die Frage wurde in fünf Antworten viermal das Mechanische Recycling als aktuell bedeutendstes Verfahren genannt. Dazu wurde einmal Second-Hand *„eher Vermeidung als Recycling“* genannt. Drei der Befragten sahen das größte Potenzial beim chemischen Recycling, wobei eine Person die Anmerkung machte, *„ökologisch sinnvolle Verfahren sollten gefördert werden“*.

Dies entspricht auch weitgehend der Ansicht und Erwartungshaltung der befragten Industrieteilnehmer.

19. Was geschieht mit den Abfallprodukten/Reststoffen der Recyclingprozesse?



Die Frage haben fünf der Teilnehmer (71 %) beantwortet. Wie die Industrieteilnehmer sind sich auch die Experten einig, dass in der Praxis versucht wird, so viel Material wie möglich dem eigenen Prozess wieder zuzuführen oder die Reste am Ende für den eigenen Wärmebedarf thermisch zu verwerten, um möglichst wenig entsorgen zu müssen. Beispiele sind u. a.:

„Metalle (sind) aussortierbar, dann Kaskadisch: Staub als Füllmaterial oder Verbrennung“

„Thermische Verwertung, teils im/für eigenen Prozess“

*„Stäube: brikettiert → Papier, Kartonagen,
Jeans → €-Banknoten,
Reststoffe → Deponie“*

20. Weitere Stichworte ohne direkten Zusammenhang mit den Fragen



Die Frage wurde von allen so abgefragt, aber gleichzeitig auch als Sammelstelle für alle im Interview gemachten Aussagen benutzt, die nicht in den Kontext der jeweiligen Frage passten. Insgesamt wurden dazu sechs Aussagen (86 %) erfasst. Diese werden hier nur soweit wiedergegeben, wie sie für den Fokus der Studie von Belang sind. Beispiele sind u. a.:

„wir haben zu wenig Spinnkapazitäten in Europa für direktes Recycling. Dadurch

„Lücke“ im Stoffkreislauf: unklare Herkunft von Rezyklaten“

„es ist günstiger, neu virgin zu kaufen als Recycling einzusetzen“

„Re-use im Export massiv unter Druck; aber wenig echtes Re-use innerhalb von DE“

„In Alttextilien sind zu viele Komponenten“

Die Anmerkungen adressieren allgemeine Probleme des europäischen Textilrecyclings, die vorrangig einen wirtschaftlichen Hintergrund haben (fehlende Spinnkapazitäten, Preis der Rezyklate, zu viele Komponenten), die jedoch nicht vom Markt gelöst werden können. Wie in den nachfolgenden Industrieinterviews wird auch hier indirekt die Notwendigkeit staatlicher Regelungen, beispielsweise durch eine EPR, gefordert.

3.2.2 Industrieinterviews

Zur Durchführung der Industrieinterviews wurden Anfragen an 21 Firmen gestellt, die zu insgesamt 13 Industrieinterviews führten. In den Interviews waren Vertreter folgender Firmen beteiligt:

- **ALTEX Textil Recycling GmbH & Co. KG**, Gronau-Epe, DE; mechanisches Textilrecycling
- **AUTEFA Solutions Germany GmbH**, Friedberg, DE; Anlagenbau im Bereich des Textilrecyclings für die Faservorbereitung und Vliesbildung aus recycelten Fasern
- **Boer Group/Frankenhuis**, Almelo, NL; Sammlung, Sortierung und mechanisches Recycling
- **Coöperatieve CIBUTEX**, Amsterdam, NL; Kollaborationsplattform und Dienstleister, Sammlung, Sortierung und Verwertung von B2B-Alttextilien

- **Circularity Germany**, Hamburg, DE; Mechanisches Faser-zu-Faser-Recycling, vollständig recycelte Textilien
- **Lenzing AG**, Lenzing, AT; Recycling von Baumwolle und Cellulose als Rohmaterial für Lyocell- und Viskosefasern
- **Recover Textile Systems SL**, Banyeres de Mariola, ES; Mechanisches Textil-zu-Textil-Recycling
- **Reju**, Nanterre, F; Chemisches Textilrecycling mit Fokus PES
- **Rieter AG**, Winterthur, CH; Anlagenbau im Bereich des Textilrecyclings: Spinnssysteme für Ring- und Rotorspinnereien
- **Södra**, Växjö, SE; chemische Verwertung von Cellulosetextilien im industriellen Maßstab
- **Spinning Jenny B. V.**, Nijverdal, NL; Garne aus recycelten Fasern
- **Trützschler Group SE**, Mönchengladbach, DE; Textilmaschinen für die Verarbeitung von Produktionsabfällen und Alttextilien, spezielle Kardengarnituren für das Recycling
- **URNS faserkreislauf**, Ansbach, DE; Rücknahmekonzepte für Alttextilien B2B, mechanische Faser-zu-Faser-Rückgewinnung

Die Auswahl der interviewten Firmen deckt die zentralen Bereiche des Textilrecyclings gut ab. Die genaue Zuordnung der Interviewpartner kann den Fragen 1–3 entnommen werden.

Auch in den Industrieinterviews ist die hohe Bereitschaft der Interviewten, Informationen zu vermitteln, deutlich erkennbar.

Ohne den Fragenblock „Sortierung/Reißerei“, der nur von Teilnehmern mit eigenen Aktivitäten in diesen Bereichen beantwortet werden sollte, beträgt die durchschnittliche Antwortquote 85 %. Inklusive aller Fragen beträgt die Antwortquote 75 %. Auf dieser Basis kann somit eine valide Auswertung der Interviews erfolgen.

Zu Beginn des Interviews wurden die Teilnehmer gebeten, anzugeben, in welchen Bereichen des Textilrecyclings sie aktiv sind. Dabei war die Mehrfachnennung ausdrücklich zugelassen. In  **Abbildung 16** sind die Antwortquoten je Marktbereich dargestellt.

Im Ergebnis wird klar deutlich, dass mit drei Viertel die große Mehrheit der Teilnehmer in den Bereichen Reißerei (mechanisches Recycling) und Weiterverarbeitung der Rezyklate (v. A. Garnherstellung, Vliesstoffproduktion) aktiv ist.

Die Antworten erfassen teilweise Bereiche, die von Unterauftragnehmern der Interviewpartner bearbeitet werden. Nur dadurch sind die Bereiche 8 und 10 mit mehr als einer Nennung vertreten.

- 21.** Welche Technologien wenden Sie an?
Welche Besonderheiten sind mit Ihren Methoden verbunden?



Die Frage wurde ebenfalls von allen 13 Teilnehmern (100 %) beantwortet. Die Antworten spiegeln die Zuordnung zu den Marktsegmenten wider:

- 3 systemübergreifende Akteure:
 - 2 x Kette von Alttextil bis zum Neutextil (z. T. durch Unteraufträge)
 - 1 x übergreifendes B2B-Netzwerk (z. T. durch Unteraufträge)
- 3 Maschinenbauer, davon alle kardieren und spinnen, sowie:
 - 1 x Reißmaschinen aus Mutterkonzern, und
 - 1 x Vliesstoffherstellung (kardieren bzw. Airlay) für Automotive, Dämmmatten etc.



Abbildung 12: Erfasste Bereiche des Textilrecyclings.



Abbildung 13: Adressierte Märkte der Interviewteilnehmer.

- 6 Recycler, z. T. mit Weiterverarbeitung im Unterauftrag:
 - 3 x mechanisches Recycling
 - 1 x Monomerrecycling
 - 2 x Polymerrecycling
- 1 Weiterverarbeiter (Spinnerei)

Anschließend wurden die von den Teilnehmern adressierten Märkte erfasst. Auch hier war eine Mehrfachnennung ausdrücklich zugelassen. Das Ergebnis ist in ► [Abbildung 17](#) dargestellt: Alle Teilnehmer sind mindestens europaweit (54 %) engagiert, die große Mehrheit sogar weltweit (85 %). Für lokale oder nationale Märkte gab es keine Nennungen.

22. Gab es in den letzten Jahren Marktkonzentrationen in Ihrem Marktsegment? Prognose?



Die Frage wurde von zehn Teilnehmern (77 %) beantwortet. Dabei sagt die klare Mehrheit von neun Teilnehmern „Nein“. Einige liefern dazu Anmerkungen, z. B. „... Finanzierungsnot. Grund sind schlechtere angelieferte Qualitäten.“ Die gegenteilige Einzelmeinung lautet „Konzentration auf Firmen mit Marktkonzept“.

23. Welche Firmen kennen Sie im Marktsegment Ihrer Zulieferer bzw. Ihrer Kunden?



Die Fragen wurden von 10 (77 %) bzw. 9 Teilnehmern (69 %) beantwortet.

Je nach Marktsegment tauchen auch hier immer wieder unterschiedliche Namen auf, wobei Rohstofflieferanten wie Gessner, Altex, AKtex, Caritas NL/BE, Frankenhuis, Industriegewäschereien, ReTex, Rester, LSJH, TexAid und Descartex (Slowakei) besonders häufig genannt werden. Darüber hinaus werden Lieferanten aus der Ukraine, Litauen, Tschechien, Ungarn und Rumänien erwähnt, allerdings ohne Namensnennung.

Die Liste ist in etwa so vielfältig wie das Feld der Interviewpartner und kann deshalb auch nicht im Detail kommentiert werden.

Der folgende Fragenblock richtete sich ausschließlich an Interviewpartner, die im Bereich Sortierung selbst aktiv sind.

24. Manuelle Sortierung: Nach welchen Kategorien wird sortiert?



Auf die Frage wurden sechs Antworten gegeben (46 %). Die Antworten beschreiben im Wesentlichen die Sortierung nach den Kriterien Material, Farbe und Mischung (letzteres mit NIR-Kontrolle). Einige Antworten enthalten weitere Details und Besonderheiten:

- „Vorsortierung: Wiederverwendbar & Marktfähig nach Vorgabe ~60 Sorten;
dann Feinsortierung: Material ~300 Sorten“
- „Sortierung manuell, nach Material getrennt; Versand in Kartons oder gepresst“

25. Automatische Sortierung: Welche Verfahren kommen zum Einsatz? Erfolgt schon Einsatz von KI?



Die Frage erhielt fünf Antworten (39 %): einmal nein sowie vier bejahende Antworten. Dies sind:

- „KI in Schuhsortierung (Erkennung zusammengehöriger Paare aus Einzelschuhen)“
- „Greifer mit KI-Unterstützung“
- „AI wird in Sortierprojekten getestet und soll Kosten auf 100 €/t reduzieren“
- „Kamera + (N)IR + KI → 98 % Erkennung“

26. Was sind typische Probleme in der Sortierung?



Die Frage erhielt vier Antworten (31 %), u. a.:

- „Elastan, Schmutz“
- „Personal → Preis“
- „(der Kunde) braucht gut sortiertes Material. Das macht den Prozess einfacher“

Die beiden Fragen zum Bereich Reißerei erhielten acht bzw. fünf Antworten (62 bzw. 39 %).

27. Wie ist der Umgang mit Fremdbestandteilen (Knöpfe etc.)?



Zur Frage gibt es bei sechs von acht Befragten eine im Prinzip einheitliche Meinung: das Problem ist anlagentechnisch gelöst. Je einmal wurde „wird manuell abgetrennt“ & „für post-industrial nicht zutreffend“ angegeben.

28. Was sind die typischen Probleme?

Die Frage wurde individuell verschieden beantwortet. Beispiele sind:

- „(gute) Sortierung sichert Qualität“
- „Multilayer; zu feine Gewebe“
- „schlechte Qualität, kein Design4recycling“

29. Wie ist der Umgang mit Mischtextilien?

Die Frage wurde von zwölf Teilnehmern (92 %) beantwortet. Alle Antworten waren positiv im Sinne von „prinzipiell machbar“ bis „kein Problem“. Weitere Beispiele sind u. a.:

- „nur PES/CO-Mischungen“ in Verarbeitung
- „Mischungsverhältnis ändert sich im Prozess“
- „Man muss mit Varianz im Material umgehen können“
- „Mischfasern: mit Airlay können alle Materialien verarbeitet werden“

30. Wie ist der Umgang mit Funktionstextilen/Ausrüstung? (z. B. Outdoor)

Auf die Frage Antworteten zehn der Teilnehmer (77 %). Alle Antworten waren negativ im Sinne von „wird nicht gemacht“ bis „beim Vorlieferanten aussortiert“. Beispiele sind u. A.:

- „wird nicht angenommen“ oder „wird nicht gemacht (Kosten)“
- „schlecht zu reißen, PFAS“
- „kann man wahrscheinlich nicht mal in Isolationsmatten einbringen“

Bei dieser Frage steht die Wahrnehmung der Praktiker im klaren Gegensatz zur Literaturlage sowie zu den Aussagen von Outdoor-Herstellern. Dies deutet darauf hin, dass es im Recycling von Outdoorbekleidung lediglich Insellösungen einzelner Marken gibt, die in der Summe jedoch nur einen marginalen Teil des Alttextilstoffstroms ausmachen können.

31. Wie ist der Umgang mit Elastan o. ä.?

Die Frage wurde von zwölf der Teilnehmer (92 %) beantwortet. Alle Antworten waren positiv im Sinne von „ist ein Problem, das man im Griff hat“. Beispiele sind u. a.:

- „kleine Anteile sind o. k.“, die Angaben bewegen sich im Bereich 5–10 %
(Ausnahme: Zellstoffprozess zu Cellulosefasern: < 1 %)
- „(Elastan) ist nach Spinnen auch außen → Färben nötig“
- „im Reißen geht mehr (Elastan), aber die Kunden wollen das nicht“
- „gute Sortierung sichert Qualität“

32. Auf die Frage zur technischen Reife

wurden elf Antworten (85 %) gegeben. Dabei konzentrierten sich die Teilnehmer auf ihre eigenen Bereiche. Zu den einzelnen Bereichen gibt es, wie in  Abbildung 18 aufgelistet, nur einzelne Antworten. Diese beruhen jedoch auf Expertise. Die Antworten zur Bewertung von Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit sind in der Regel „ja“ oder „neutral“ und wurden deshalb lediglich als Summe gezählt, aber nicht weiter spezifiziert.

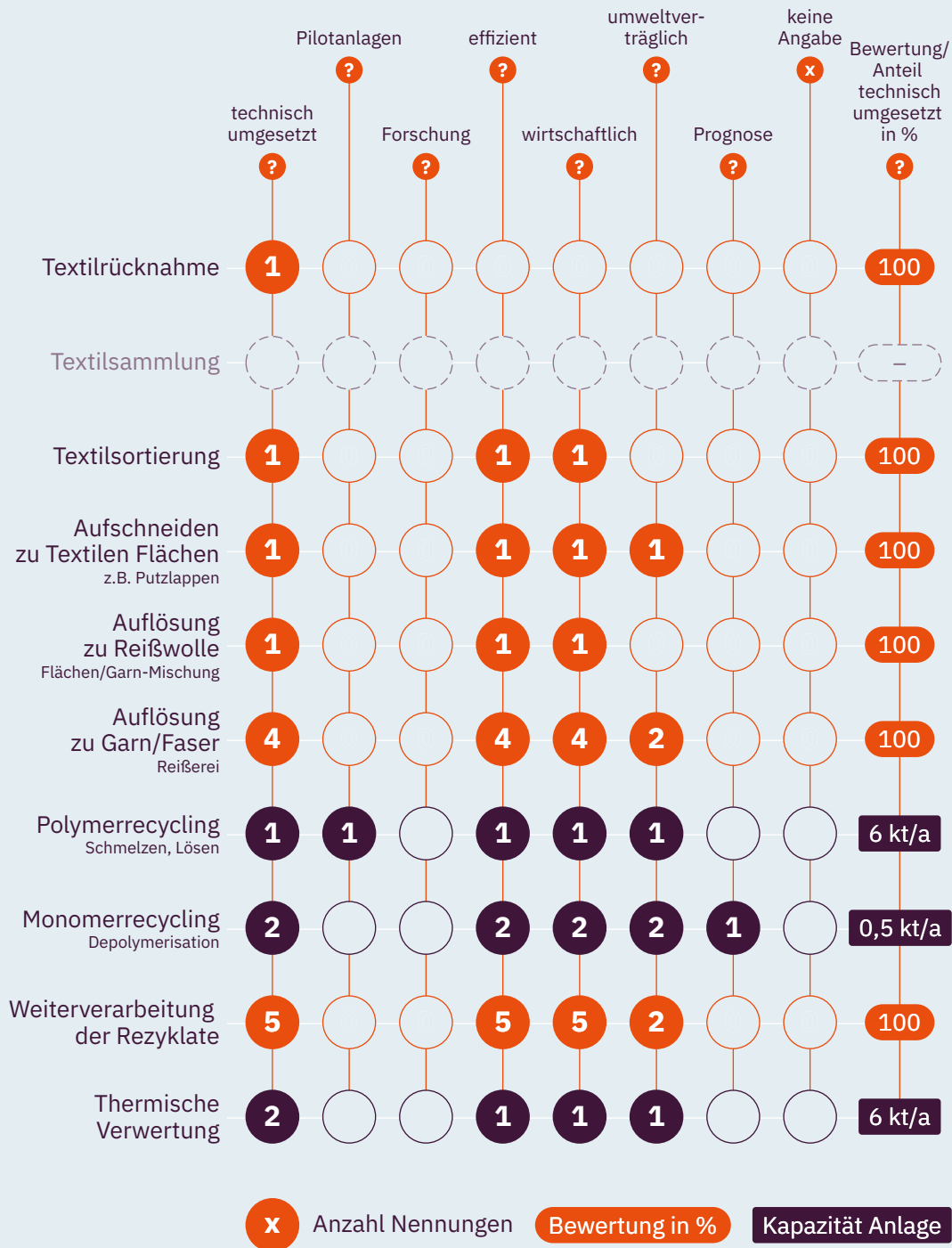


Abbildung 14: Einschätzung der technischen Reife.

Der Bereich der Textiltrücknahme, zu dem kein Interviewpartner eine Aussage gemacht hat, ist rot markiert. Er wird daher nicht bewertet. Die anderen Bereiche von 1 (Textilsammlung) bis 6 (Reißerei) sowie 9 (Weiterverarbeitung der Rezyklate) sind nach Ansicht der Interviewpartner dagegen im Industriemaßstab etabliert.

Im Bereich des Polymerrecyclings gibt es hingegen erst wenige Industrieanlagen, beispielsweise bei Södra mit einer Kapazität von 6 kt/a (ein Scale-up auf 50 kt/a ist geplant). Hier wird PES im Prozess chemisch abgetrennt, depolymerisiert (patentiertes Verfahren) und als Prozesswärme thermisch verwertet. Dies ist die einzige bekannte Aussage zu in Betrieb befindlichen Industrieanlagen in diesem Bereich. Der Zellstoff wird bei Lenzing wieder zu Fasern verarbeitet. Aufgrund des etwa dreifachen Rohstoffpreises entstehen Mehrkosten: Die Rezyklatfasern sind ca. 20 % teurer als Virgin-Fasern.

Damit ist das mechanische Recycling derzeit das einzige in großem Maßstab praktizierte Verfahren im Textilrecycling, wie die Befragten der Industriepartner übereinstimmend angeben.

Dazu gibt es Kommentare, z. B.:

- „Sammlung, manuelle Sortierung funktionieren, aber die automatische Sortierung ist noch nicht ökonomisch“
- „Prognose: Recycling post-industrieller Textilien klappt gut, bei post-consumer Textilien weniger gut“
- „Im mechanischen Recycling gibt es rund 380 Anlagen, das Anlagenkonzept wurde in den 80er Jahren speziell für das Recycling entwickelt. Seit 5 Jahren wieder im Trend.“
- „Erste Anlage zum Polymerrecycling mit ~1000 t/a wird von Reju in Frankfurt gebaut.“

33. Welche der von Ihnen betriebenen Recyclingverfahren sind für welche Produkte/Fasern/Mischungen besonders geeignet/nicht geeignet?



Auch diese Frage wurde entsprechend spezifisch beantwortet:

- „Mechanisches Recycling und nachfolgendes Verspinnen zu Garn: optimal geeignet sind Reinfaserfraktionen; ähnlich gut PES/CO Mischungen. Ungeeignet sind Fasergemische mit mehr als drei Komponenten, Funktionstextilien, Feine Gewebe, metallisierte Fasern etc.“
- „Mechanisches Recycling und nachfolgendes Verarbeiten zu Vliesstoffen für Drainagerohre, Schallisolierung, Automotive ist optimal geeignet für fast alle Fasern. Ungeeignet sind Fasern kürzer als 20 mm sowie Funktionstextilien, Jacken etc.“
- „Polymerrecycling von Cellulose im Zellstoffprozess und wiederverspinnen zu Fasern: geeignet sind CO (sehr gut) und Viskose, LyoCell, Hanf, Flachs (alle zellulosischen Fasern, aber niedrigere Ausbeute als bei CO). Ungeeignet sind Elastan, PA, große Mengen (> 30 %) PES. Auch optische Aufheller sind ein Problem.“

34. Welche Recyclingverfahren haben aktuell die größte Bedeutung?



Die Frage erhielt elf Antworten (85 %):

- 8 Antworten: „mechanisches Recycling“
- 2 Antworten: „mechanisches und chemisches Recycling“
- eine Antwort „mechanisches, thermomechanisches und chemisches Recycling“

- Vier Teilnehmer nennen (großes) Potenzial für das chemische Recycling (ggf. komplementär zu mechan. Recycling)
- Ein Teilnehmer nennt Potenzial für das Polymerrecycling

Die Teilnehmer sehen damit eindeutig das mechanische Recycling als aktuell hauptsächlich praktizierten Weg des Textilrecyclings. Danach wird das größte Potenzial im chemischen Recycling gesehen.

35. Was geschieht mit den Abfallprodukten/Reststoffen der Recyclingprozesse?



Die Frage wurde von zehn Teilnehmern (77 %) beantwortet. Alle versuchen, so viel Material wie möglich in den eigenen Prozess zurückzuführen. Lediglich wenige Reststoffe gehen letztlich in die thermische Verwertung. Beispiele:

- „Sortierung → thermische Verwertung;
Reißen Kurzfasern → Papier;
Metalle/Knöpfe → Müll“
- „Schwerteile → Recycling;
Stäube → thermische Verwertung;
auch Nassvlies in Entwicklung“
- „~3 % Abfall“
- „thermische Nutzung als Prozesswärme“
- „In Vliesstoff geht alles!“

36. Weitere Stichworte ohne direkten Zusammenhang mit den Fragen



Die Frage wurde von allen abgefragt, aber gleichzeitig auch als Sammelstelle für alle im Interview gemachten Aussagen benutzt, die nicht in den Kontext der jeweiligen Frage passten. Insgesamt wurden dazu elf Aussagen (85 %) erfasst. Diese werden hier nur insoweit wiedergegeben, wie sie für den Fokus der Studie von Belang sind. Beispiele sind:

- „Flammschutz auf PA geht, aber will keiner haben“
- „Mechanisches Recycling: Anlagen der Wettbewerber sind nicht vergleichbar
„unterschiedliche Karden gehen mit Material verschieden um“
- „Recycling-PET im Markt ist aus Flaschen, nicht aus Textilien → open loop“
- „Problem: Gesetzgebung“
- „Recycling wird nur durch gesetzlichen Druck funktionieren (z. B. Mindestrecycling-anteil in Textilien festlegen); aber: die Firmen müssen trotzdem noch Geld verdienen können“
- „Gerade bei chemischem Recycling sind Recyclingpreise extrem zu hoch. (5–10 € pro kg) → EPR als sinnvolles System, um die nötige Finanzierung zu erreichen“
- „Sortierung wird oft unterschätzt, ist aber für den Prozess entscheidend → möglichst mit AI“

Fehlende bzw. mangelhafte gesetzliche Rahmenbedingungen werden häufig als Hemmnis des Textilrecyclings identifiziert. Offen bleibt, wie die europäische Richtlinie auf nationaler Ebene umgesetzt wird.

3.3

Zusammenfassung Interviews

Die Interviews mit Experten und mit Vertretern der Industrie sind in den vorangegangenen Abschnitten detailliert dargestellt. Obwohl die Interviews teilweise unterschiedliche Inhalte hatten, unterscheiden sich die Ergebnisse nicht so stark wie ursprünglich erwartet. In diesem Abschnitt werden die Inhalte zusammengefasst und Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede beschrieben.

Die hohe Bereitschaft der Teilnehmer zur Informationsvermittlung wurde anhand der hohen Antwortquoten in allen Interviews deutlich. Diese beträgt im Durchschnitt 85 % in den Experteninterviews. In den Industrieinterviews gab es den Fragenblock „Sortierung/Reißerei“, der nur von Teilnehmern mit eigenen Aktivitäten in diesen Bereichen beantwortet werden sollte. Ohne diesen Block beträgt die durchschnittliche Antwortquote auch hier 85 % und ist somit identisch zu den Experteninterviews. Inklusive aller Fragen beträgt die Antwortquote 75 %. Die Auswertung beider Interviewserien kann somit auf valider Basis erfolgen.

3.3.1

Stoffströme und Einklassierung der Teilnehmer

Die Auswertung des Fragenblocks zu den Stoffströmen in den Experteninterviews führte zu kleineren Ergänzungen der in Abschnitt 2.2.3.2 betrachteten Stoffströme.

Daneben wurde mehrfach auf die Gefahren durch die neue Abfallverordnung der EU hingewiesen. Diese beschneidet bestehende Märkte – zukünftig soll der Export von textilen Abfällen durch eine Vorsortierung in der EU verhindert werden – und vergrößert gleichzeitig das Rohstoffaufkommen durch die Pflicht zur getrennten Sammlung von Alttextilien, wodurch sich die durchschnittliche Qualität verschlechtert. Gleichzeitig werden keine neuen Absatzmärkte für die Akteure geöffnet. Die Teilnehmer der Industrieinterviews äußerten sich hierzu gleichlautend, allerdings aufgrund der anderen Interviewstruktur überwiegend in allgemeinen Stichworten am Ende des Interviews.

Somit schätzen alle Interviewten dieses Thema als sehr wichtig ein.

In Bezug auf Marktkonzentrationen entlang der Stoffströme unterscheiden sich die Antworten der Experten signifikant von denen der befragten Personen aus der Industrie. Letztere sehen in ihrer Praxis keine Marktkonzentration.

Grund für diesen Unterschied ist vermutlich der unterschiedliche Fokus der befragten Gruppen. Die Befragten aus der Industrie konzentrieren sich auf ihr eigenes Marktsegment und die dort engagierten anderen Akteure. Die Experten haben dagegen oft den weltweiten Gesamtsektor des Textilrecyclings in den Fokus genommen. Dies spiegelt sich vor allem in den bejahenden Antworten wider. Diese beziehen sich u. a. auf die „*Textilbranche in Asien*“ oder die „*Konzentration bei Sammlern*“ und auf die Beobachtung, dass sich das Textilrecycling (weltweit) durch die Tendenz zu weniger, aber größeren Firmen weiter beschränke „*auf PES, CO, PA im großen Stil*“.

Die Gegenmeinung bezieht sich, ähnlich wie der Fokus der befragten Personen aus der Industrie, eher auf den europäischen Markt. Sie wird damit begründet, dass beispielsweise „*mehr Feedstock verfügbar (ist), als verarbeitet werden kann*“ und im Markt „*eher Dekon-*

zentration als Konzentration“ erfolge. Dies wird dadurch gestützt, dass sich im Markt abseits des mechanischen Recyclings eher Start-ups mit unterschiedlichen Materialkombinationen etablieren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Markt in der EU derzeit in Bewegung ist. Die Entwicklung wird jedoch durch viele kleine Akteure vorangetrieben.

Im Rahmen der Industrieinterviews wurden die Teilnehmer zusätzlich nach ihrer eigenen Einstufung in die Wertschöpfungskette des Textilrecyclings und den von ihnen adressierten Märkten gefragt. Das Ergebnis ist eindeutig: Mit drei Viertel ist die große Mehrheit der Teilnehmer in den Bereichen Reißerei (mechanisches Recycling) und Weiterverarbeitung der Rezyklate (vor allem Garnherstellung und Vliesstoffproduktion) aktiv. Gleiches gilt für die adressierten Märkte: Alle Teilnehmer sind mindestens europaweit (54 %) engagiert, die große Mehrheit sogar weltweit (85 %).

3.3.2 Sortierung und Reißerei

Der Fragenblock zur Sortierung wurde in beiden Gruppen weitgehend gleich, aber mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad beantwortet: Im Wesentlichen erfolgt die Sortierung nach den Kriterien Material, Farbe und Mischung (letzteres mit NIR-Kontrolle), wobei am Ende oft mehrere hundert Kategorien entstehen. Der Einsatz von KI beschränkt sich derzeit noch auf Forschung und Pilotanlagen. Als Probleme bei der Sortierung werden Elastan, Personalkosten und Materialmischungen mit zu vielen Komponenten genannt. Eine ausführliche Darstellung findet sich in den Experteninterviews in [Abschnitt 3.2.1](#).

In Bezug auf den Umgang mit Fremdbestandteilen (z. B. Knöpfe) herrscht unter den Befragten im Prinzip Einigkeit: Das Problem ist anlagentechnisch gelöst. Die Details sind in den Experteninterviews dargestellt.

Der Umgang mit Mischtextilien, Funktionstextilien (Outdoor) und Elastan in der Reißerei wird von beiden Gruppen ähnlich gesehen. Mischungen mit zu vielen Komponenten sind problematisch bzw. nicht kostendeckend vermarktbare und werden deshalb gerne vermieden. Outdoor-Textilien werden derzeit als nicht recycelbar zurückgewiesen und sind bestenfalls für die thermische Verwertung geeignet. In Frage käme dafür höchstens die getrennte Sammlung als sortenreiner Stoffstrom durch die Marken für ein chemisches Recycling. Elastan kann zwar mitgerissen werden, stört aber in der nachgeschalteten Weiterverarbeitung und darf deshalb nur zu kleinen Anteilen im Rezyklat enthalten sein: 2–5 % für mechanisches oder < 1 % für chemisches Recycling.

3.3.3 Technischer Reifegrad und Bedeutung der Verfahren

Nach Ansicht der meisten Befragten ist das mechanische Recycling derzeit das einzige im Textilrecycling in industriellem Maßstab praktizierte Verfahren. Dazu gehören die vorgeschalteten Stufen der Sammlung und Sortierung, die nachgeschaltete Weiterverarbeitung zu Vliesstoffen bzw. Garnen/Geweben und die thermische Verwertung von Reststoffen.

Für die weiteren Verfahren des thermischen und chemischen Recyclings gibt es bislang zwar eine große Zahl kleiner Akteure im Forschungs- und Pilotanlagenmaßstab, aber nur eine Anlage im kleinen Industriemaßstab für das chemische Recycling bei Södra. Auch Circulose (ehemals Renewcell) war im Celluloserecycling aktiv und verfügte angeblich über eine Kapazität von 60 kt/a; der aktuelle Status war zum Zeitpunkt des Interviews jedoch unklar.

Entsprechend sehen sowohl Experten als auch Industrievertreter das mechanische Recycling als aktuell hauptsächlich praktizierten Weg des Textilrecyclings. Das größte Zukunftspotenzial wird hingegen dem chemischen Recycling zugeschrieben.

3.3.4 Allgemeine Fragen zum Abschluss

Hinsichtlich des Umgangs mit Reststoffen aus den Recyclingprozessen sind sich beide Gruppen der Interviewten einig: In der Praxis wird versucht, so viel Material wie möglich dem eigenen Prozess wieder zuzuführen oder die Reste am Ende für den eigenen Wärmebedarf thermisch zu verwerten, um möglichst wenig entsorgen zu müssen. Die entsprechenden Details sind in beiden Interviews aufgeführt.

Die beiden Gruppen bewerten die Eignung der verschiedenen Recyclingverfahren für die verschiedenen Arten von Rezyklaten ähnlich, allerdings mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Die Ergebnisse der Experteninterviews sind in  Abbildung 15 zusammengefasst. Sie geben einen konzentrierten Überblick über die Eignung bzw. Nichteignung der verschiedenen Recyclingverfahren für die unterschiedlichen Rezyklate.

Alle Teilnehmenden gaben auch zu Stichworten ohne direkten Bezug zu den Interviewfragen Auskunft. Diese Frage ermöglichte es, weitere, nicht kontextgebundene Aussagen zu erfassen. In beiden Interviewserien adressieren die Teilnehmer allgemeine Probleme des europäischen Textilrecyclings, die vorrangig einen wirtschaftlichen Hintergrund haben (fehlende Spinnkapazitäten, Preis der Rezyklate, zu viele Komponenten), die jedoch nicht vom Markt gelöst werden können. Hinzu kommen technische und die Stoffströme betreffende Anmerkungen aus den Industrieinterviews. Auffällig ist bei beiden die häufige Nennung fehlender bzw. unzureichender gesetzlicher Rahmenbedingungen, die als Hemmnis für ein funktionierendes Textilrecycling gesehen werden. In dieser Hinsicht bleibt abzuwarten, wie die europäische Richtlinie in nationales Recht umgesetzt wird.

4

Zusammenführung und Bewertung der Ergebnisse

Die Literaturrecherche in Wissenschaftsdatenbanken umfasste 115 Datensätze [Abschnitt 2.2.2](#). Diese wurden in drei Gruppen kategorisiert. Die Kategorien der ersten Gruppe erlauben eine inhaltliche Einordnung der jeweiligen Publikation nach Teilgebiet innerhalb der Wertschöpfungskette des Textilrecyclings. Die Kategorien der zweiten Gruppe erlauben die Einstufung des technischen Reifegrades der beschriebenen Technologien von „Forschung“ bis „Technisch umgesetzt“ sowie die Einordnung der Publikation nach den Kriterien „Ökonomie“ und „Ökologie“. Als Ergänzung werden die Publikationen zusätzlich noch nach den bibliometrischen Kriterien „Review“ und „Tagungsband“ als Kennzeichnung für Übersichtsliteratur kategorisiert.

Wie zu erwarten war, beschreiben 56 % der Publikationen überwiegend den Stand der Forschung. Fast 30 % befassen sich mit technisch umgesetzten Verfahren, weitere 15 % mit Pilotanlagen. Insgesamt behandelt rund ein Drittel der Literatur ökonomische (12 %) bzw. ökologische Aspekte (17 %).

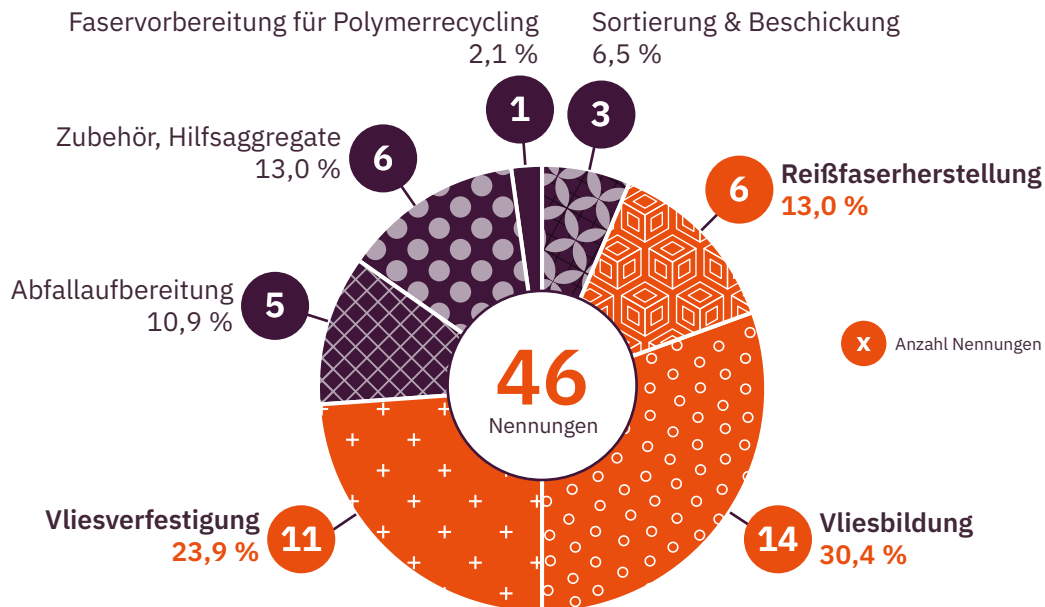
In Bezug auf den Teil der Wertschöpfungskette befassen sich die meisten Publikationen mit dem mechanischen Recycling (40 %) bzw. dem Monomerrecycling (41 %). Auch die Textilsortierung ist mit 30 % der Nennungen von wesentlicher Bedeutung.

In der zweiten Teilrecherche wurden in Wirtschaftsdatenbanken ergänzend gezielt die aktuellen Akteure im Textilrecycling identifiziert [Abschnitt 2.2.2](#). Dabei zeigten sich gravierende Unterschiede zwischen dem Stand der Forschung und dem aktuellen Marktgeschehen: Aktuell bedeutet Textilrecycling im industriellen Maßstab ausschließlich mechanisches Recycling. Für das Polymerrecycling wurden zwar bereits einzelne Anlagen ausgeliefert. Das bedeutet jedoch nicht, dass dieser Prozess weit verbreitet angewendet wird oder große Marktanteile hat (hierzu auch die [Auswertung der Interviews](#)).

Noch gravierender ist die Diskrepanz beim chemischen/Monomer-Recycling: Es wird in der wissenschaftlichen Literatur ausführlicher behandelt als die anderen Recyclingprozesse, ist in der industriellen Umsetzung aber bisher nur im Bereich von Start-ups oder Pilotanlagen angekommen. Die einzige Ausnahme ist die Kooperation von Södra und Lenzing. Sie betreiben eine Anlage zum Recycling von Cellulose aus Baumwolltextilien (Södra), um diese Cellulose in ReFibra-Fasern (Lenzing) wiedereinzusetzen. Vgl. hierzu auch die [Auswertung der Interviews](#) mit weiteren Details.

Eine inhaltliche Lücke bestand bei der Identifikation von Akteuren, die die Textilrecycler mit Anlagen beliefern. Diese gehören klassisch zu den Maschinenbauern bzw. zum Teil auch zum Bereich Chemie und konnten durch die verwendeten Suchstrategien nur schlecht bzw. unvollständig erfasst werden. Daher wurden in einer dritten Recherche zusätzlich die Tagungsbände der Konferenz re4tex ^{100–105} herangezogen, die jedes zweite Mal einen umfassend aufgearbeiteten Rückblick auf die ITMA desselben Jahres enthalten. Die ITMA ist die größte europäische Messe der Textil- und Bekleidungsindustrie. Sie findet alle vier Jahre statt und Textilmaschinenhersteller aus der ganzen Welt nehmen daran teil. Um einen Eindruck von der Marktentwicklung zu erhalten erfolgte schließlich ein statistischer Vergleich der ITMA-Rückblicke von 2015 ¹²³ und 2023 ¹²⁴ [Abschnitt 2.2.3.3](#).

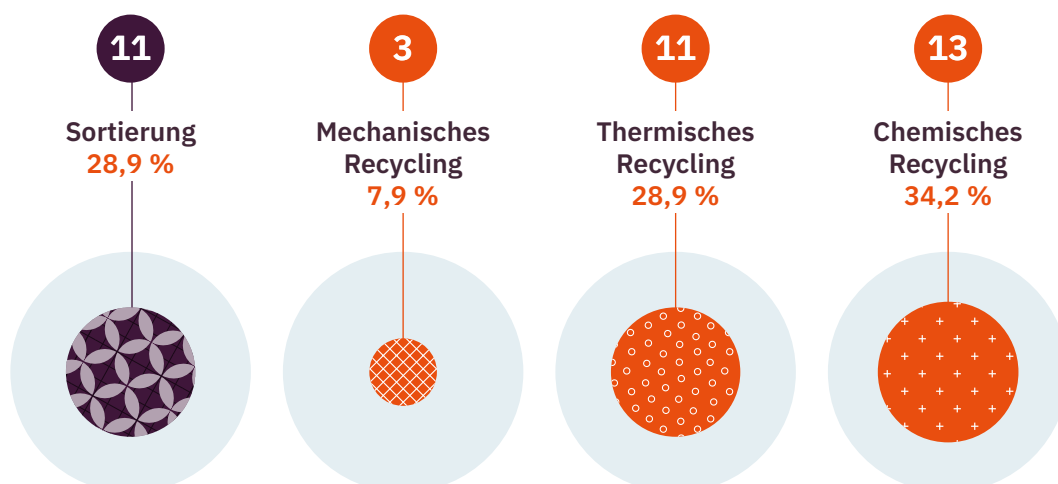
Die Sammlung ist nach Technologiefeldern gegliedert und umfasst mehrfache Nennungen einzelner Anlagenbauer in verschiedenen Bereichen. Insgesamt gibt es 46 Nennungen.



Auch hier wird die Dominanz des mechanischen Recyclings noch einmal deutlich: Mit 67,3 % machen die Bereiche von der Reißfaserherstellung bis zur Vliesverfestigung zusammen rund zwei Drittel der Nennungen aus.

Parallel zu den umfangreichen aktuellen Forschungsarbeiten werden die Technologien des thermischen und chemischen Textilrecyclings bereits über das Pilotstadium hinaus weiterentwickelt. Die Anlagentechnik stammt überwiegend aus der chemischen Industrie. Damit werden sie durch die oben genannten Quellen (zumindest noch) nicht gut abgedeckt. Einen guten Überblick darüber liefert das Whitepaper von Stubbe et al 2024¹⁰⁶.

Dies ist derzeit die beste verfügbare Auflistung der Akteure im Anlagenbau für das thermische und chemische Textilrecycling. Sie umfasst 38 Akteure, die jeweils nur für ein Technologiefeld aufgeführt sind. Nach Bereichen gegliedert sind dies:



Damit sind mehr als 60 % der Firmen aus den neuen Technologiebereichen des thermischen und chemischen Textilrecyclings enthalten. Sie sind tabellarisch in [Abschnitt 2.2.3.3](#) aufgelistet.

Im zweiten Teil der Studie wurden insgesamt acht Interviews mit Experten sowie 13 Interviews mit Industrievertretern ([Abschnitt 3.2.1 – Abschnitt 3.3](#)) geführt. Obwohl die beiden Interviewserien teilweise unterschiedliche Inhalte hatten, unterscheiden sich die Ergebnisse nicht so stark wie ursprünglich erwartet.

Die hohe Bereitschaft der Teilnehmer zur Informationsvermittlung wurde anhand der hohen Antwortquoten in allen Interviews deutlich. Diese beträgt im Durchschnitt 85 % in den Experteninterviews. In den Industrieinterviews gab es den Fragenblock 8–12 „Sortierung/Reißerei“, der nur von Teilnehmern mit eigenen Aktivitäten in diesen Bereichen beantwortet werden sollte. Ohne diesen Block beträgt die durchschnittliche Antwortquote auch hier 85 % und ist somit identisch zu den Experteninterviews. Inklusive aller Fragen beträgt die Antwortquote 75 %. Die Auswertung beider Interviewserien konnte somit auf valider Basis erfolgen.

Im Fragenblock zu den Stoffströmen verwiesen die Befragten hauptsächlich auf jüngere Studien/Literatur zum Thema. Am häufigsten wurde dabei die Studie des BVSE dreimal genannt. Ein aktueller Überblick zu den Stoffströmen findet sich in [Abschnitt 2.2.3.2](#). Weiter waren sich die Befragten einig, dass sich Deutschland im Textilrecycling vom Rest der EU/Welt unterscheidet, unter anderem in Bezug auf die Sammlung/Sammelsysteme und die Sortierung. Hervorgehoben wurde außerdem, dass Deutschland ein großes Potenzial bzw. einen großen Markt für Textilrecycling bietet, in Anbetracht der neuen EU-Richtlinie jedoch ergänzendes nationales Recht notwendig sei. Insbesondere die Getrenntsammelverpflichtung sei ohne ein EPR nicht sinnvoll. Als positives Beispiel wurden die Niederlande genannt.

Der Fragenblock zur Sortierung wurde in beiden Gruppen weitgehend gleich beantwortet: Im Wesentlichen erfolgt die Sortierung nach den Kriterien Material, Farbe und Mischung (letzteres mit NIR-Kontrolle), wobei sich am Ende oft mehrere hundert Kategorien ergeben. Der Einsatz von KI beschränkt sich derzeit noch auf Forschung und Pilotanlagen. Als Probleme bei der Sortierung werden Elastan, Personalkosten und Materialmischungen mit zu vielen Komponenten genannt. Eine ausführliche Darstellung findet sich in den Experteninterviews in [Abschnitt 3.2.1](#).

Der Umgang mit Mischtextilien, Funktionstextilien (Outdoor) und Elastan in der Reißerei wird von beiden Gruppen ähnlich gesehen. Mischungen mit zu vielen Komponenten sind problematisch bzw. nicht kostendeckend vermarktbar und werden deshalb gerne vermieden. Elastan kann zwar mitgerissen werden, stört aber in der nachgeschalteten Weiterverarbeitung, weshalb es nur zu kleinen Anteilen im Rezyklat enthalten sein darf: 2–5 % für mechanisches oder < 1 % für chemisches Recycling.

Outdoortextilien werden derzeit als nicht recycelbar eingestuft und sind höchstens für die thermische Verwertung geeignet. In Frage käme dafür höchstens die getrennte Sammlung als sortenreiner Stoffstrom durch die Marken für ein chemisches Recycling.

Bei dieser Frage steht die Wahrnehmung der Praktiker im klaren Gegensatz zur Literaturlage sowie zu den Aussagen von Outdoor-Herstellern. Dies deutet darauf hin, dass es im Recycling von Outdoorbekleidung lediglich Insellösungen einzelner Marken gibt, die in der Summe jedoch nur einen marginalen Teil des Alttextilstoffstroms ausmachen können.

In Bezug auf die technische Reife sind sich alle Befragten einig, dass derzeit das mechanische Recycling das einzige in industriellem Maßstab praktizierte Verfahren im Textilrecycling ist. Dazu gehören die vorgeschalteten Stufen der Sammlung und Sortierung, die nachgeschaltete Weiterverarbeitung zu Vliesstoffen bzw. Garnen/Geweben sowie die thermische Verwertung von Reststoffen.

Für die weiteren Verfahren des thermischen und chemischen Recyclings gibt es bislang zwar eine große Zahl kleiner Akteure im Forschungs- und Pilotanlagenmaßstab, aber nur eine Anlage im kleinen Industriemaßstab für das chemische Recycling bei Södra. Auch Circulose (ehemals Renewcell) war im Celluloserecycling aktiv und verfügte angeblich über eine Kapazität von 60 kt/a; der aktuelle Status war zum Zeitpunkt des Interviews jedoch unklar.

Entsprechend sehen sowohl Experten als auch Industrievertreter das mechanische Recycling als aktuell hauptsächlich praktizierten Weg des Textilrecyclings. Das größte Zukunftspotenzial wird hingegen dem chemischen Recycling zugeschrieben.

Hinsichtlich des Umgangs mit Reststoffen aus den Recyclingprozessen sind sich beide Gruppen der Interviewten einig: In der Praxis wird versucht, so viel Material wie möglich dem eigenen Prozess wieder zuzuführen oder die Reste am Ende für den eigenen Wärmebedarf thermisch zu verwerten, um möglichst wenig entsorgen zu müssen. Die entsprechenden Details sind in beiden Interviews aufgeführt.

Die Frage nach weiteren Stichworten ohne direkten Zusammenhang mit den Interviewfragen wurde von den Teilnehmern genutzt, um z. B. allgemeine Probleme des Europäischen Textilrecyclings zu thematisieren, die vorrangig einen wirtschaftlichen Hintergrund haben (fehlende Spinnkapazitäten, Preis der Rezyklate, zu viele Komponenten), die jedoch nicht vom Markt gelöst werden können. Hinzu kamen technische Anmerkungen und solche, die die Stoffströme betreffen, aus den Industrieinterviews. Auffällig ist bei beiden Gruppen die häufige Nennung fehlender bzw. unzureichender gesetzlicher Rahmenbedingungen, die als Hemmnis für ein funktionierendes Textilrecycling gesehen werden. Insbesondere wurde mehrfach auf die Gefahren durch die neue Abfallverordnung der EU hingewiesen. Diese beschneide bestehende Märkte und vergrößere gleichzeitig das Rohstoffaufkommen durch die Pflicht zur getrennten Sammlung von Alttextilien („*dadurch schlechtere durchschnittliche Qualität*“). Dabei würden keine neuen Absatzmärkte für die Akteure geöffnet.

Damit wurde dieses Thema von allen Interviewten als sehr wichtig eingeschätzt. In dieser Hinsicht bleibt abzuwarten, wie die europäische Richtlinie in nationales Recht umgesetzt wird.

Insgesamt bieten die Ergebnisse der verschiedenen Teile dieser Studie ein weitgehend einheitliches Bild, in dem sich nur wenige der im vorangegangenen Text aufgeführten Differenzen der Teilergebnisse finden. Diese Differenzen sind, wie geschildert, logisch erklärbar und lassen sich somit in dieses Gesamtbild integrieren.

5

Quellen

- 1 Löw, C.; Lorösch, H. & Moch, K.: Textilrecycling – Status Quo und aktuelle Entwicklungen. Öko-Institut e. V., Freiburg, DE 2024. Kurzstudie im Auftrag des NABU – Naturschutzbund Deutschland e.V. www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Textilrecycling-Status-Quo.pdf, gesehen 27.01.2025.
- 2 Teufel, J.; Lopez, V.; Moch, K. & Gascon, L.: Ökologische Bewertung textiler Fasern – von „klassischen“ Fasern über Recyclingfasern bis hin zu innovativen und wiederentdeckten Fasern. Öko-Institut e. V., Freiburg, DE, Texte 117 (2024), 123 Seiten. ISSN 1862-4804. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/117_2024_texte_oekologische_bewertung_textiler_fasern.pdf. Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz; Forschungskennzahl 3720 37 302 0; FB001317.
- 3 McKinsey Apparel, Fashion & Luxury Group (Hrsg.): Scaling textile recycling in Europe – turning waste into value. Broschüre, 76 Seiten. McKinsey Apparel, Fashion & Luxury Group, 2022.
- 4 Forbrig, S.; Fischer, T. & Heinz, B.: Textilstudie 2020 – „Bedarf, Konsum, Wiederverwendung und Verwertung von Bekleidung und Textilien in Deutschland“. Broschüre, 60 Seiten, bvse – Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. (2020) www.bvse.de/gut-informiert-textil-recycling/studie-2020.html 20.05.2025.
- 5 Abrishami, S.; Shirali, A.; Sharples, N.; Kartal, G. E.; Macintyre, L. & Doustdar, O.: Textile Recycling and Recovery: An Eco-friendly Perspective on Textile and Garment Industries Challenges. Textile Research Journal 94 (2024), article no. 00405175241247806, in press. ISSN 0040-5175. doi.org/10.1177/00405175241247806.
- 6 Alcantara, S.; Moore Calderón, F. & Ontaneda, M.: A Systematic Review of Recycled Cotton Fibre Blending Practices, Challenges and Recommendations. Textile & Leather Review 7 (2024), 153–175. ISSN 2623-6281. www.tlr-journal.com/tlr-2023-184-alcantara/.
- 7 Ali, A. H.M.; Elfaky, E. F.; Mohammed, S. A.; Haroon, H. E.; Eshag, I. A. & Hassan, E.: Textile recycling – A review. Global Journal of Engineering and Technology Advances 6 (2021), 69–74. ISSN 2582-5003. gjeta.com/content/textile-recycling-review.
- 8 Alpert, C.; Turkowski, M. & Tasneem, T.: Scalability solutions for automated textile sorting: a case study on how dynamic capabilities can overcome scalability challenges. University of Borås, Faculty of Textiles, Engineering and Business, University of Borås, Faculty of Textiles, Engineering and Business, Borås, SE (2021) www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1593417&dsid=-3506 02.08.2024.
- 9 Andini, E.; Bhalode, P.; Gantert, E.; Sadula, S. & Vlachos, D. G.: Chemical recycling of mixed textile waste. Science Advances 10,27 (2024), article no. eado6827. ISSN 2375-2548. [www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.ado6827](https://doi.org/10.1126/sciadv.ado6827).
- 10 Anjimon, S.; Asha, V.; Gurnani, J.; Khan, I.; Paul, S. & Al-Jawahry, H. M.: Innovations and Opportunities in Sustainable Textile Recycling. E3S Web of Conferences 507 (2024), Article no. 01065. ISSN 2267-1242. doi.org/10.1051/e3sconf/202450701065.
- 11 Anonym: Forschung: Chemisches Recycling von gemischten Textilabfällen. Cotton Report Nr. 29/30 (2024), 7.
- 12 Anonym: AMI launches Textiles Recycling Expo in Europe next year. Plastics Recycling World July/August (2024), 6. ISSN 2515-2238. content.yudu.com/web/1rl19/0A42x3p/PRWJulAug24/html/index.html?page=6&origin=reader.
- 13 Arafat, Y. & Uddin, A. J.: Recycled fibers from pre- and post-consumer textile waste as blend constituents in manufacturing 100 % cotton yarns in ring spinning: A sustainable and eco-friendly approach. Heliyon 8,11 (2022), article no. e11275. ISSN 2405-8440. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844022025634.
- 14 Baloyi, R. B.; Gbadeyan, O. J.; Sithole, B. & Chunilall, V.: Recent advances in recycling technologies for waste textile fabrics: a review. Textile Research Journal 94, 3–4 (2024), 508–529. ISSN 0040-5175. doi.org/10.1177/00405175231210239.
- 15 Bartoszek, K. & Kowaluk, G.: Utilization of Fibrous Mat Residues from Upholstered Furniture as Sustainable Fillers in Plywood Production. Materials 17,16 (2024), article no. 4080. ISSN 1996-1944. www.mdpi.com/1996-1944/17/16/4080.

- 16 Becker, A.; Datko, A.; Kroell, N.; Küppers, B.; Greiff, K. & Gries, T.: Near-infrared-based sortability of polyester-containing textile waste. *Resources, Conservation and Recycling* 206 (2024), article no. 107577. ISSN 0921-3449. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344924001721.
- 17 Beck, A.: 21.17 Baumwolle als Beispiel für die Anwendung des Stoffflußansatzes. In Quicker, P., Schnurer, H., Zeschmar-Lahl, B. (Hrsg.): *Müll-Handbuch*, Erich Schmidt Verlag, Berlin, DE, Band 4 (1999), Abschnitt A8617.2; 20 Seiten. www.muellhandbuchdigital.de/pos/1042/dokument.html. Laufend ergänzte Loseblattsammlung 🔴 22.11.2024.
- 18 Bharadwaj, C.; Purbey, R.; Bora, D.; Chetia, P.; R. U., Maheswari; Duarah, R.; Dutta, K.; Sadiku, E. R.; Varaprasad, K. & Jayaramudu, J.: A review on sustainable PET recycling: Strategies and trends. *Materials Today Sustainability* 27 (2024), article no. 100936. ISSN 2589-2347. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589234724002720.
- 19 Biermann, Y.; Quattelbaum, B. & Groten, R.: Sustainability Analysis of Decentralised Fibre-to-Fibre Scenarios – Reflecting the Amended EU-Waste Framework Directive – A Review. *iLetters* 1,1 (2021) www.ilettersicongress.co.uk/_files/ugd/030383_144759187c744b42827be1b989696ac9.pdf 🔴 02.08.2024.
- 20 Bischofberger, C.; Wille, G. & Junge, B.: 21.17 Abfallvermeidung und Abfallverwertung in der Textil- und Bekleidungsindustrie – Ergebnisse der sächsischen Branchenarbeit. In Quicker, P., Schnurer, H., Zeschmar-Lahl, B. (Hrsg.): *Müll-Handbuch*, Erich Schmidt Verlag, Berlin, DE, Band 4 (2001), Abschnitt 8617.1; 20 Seiten. www.muellhandbuchdigital.de/pos/1041/dokument.html. Laufend ergänzte Loseblattsammlung 🔴 22.11.2024.
- 21 bvse Fachverband Textilrecycling (Hrsg.): *Alttextilmarkt 2024 – Alttextilrecycling droht der Kollaps*. Marktbericht online, Bonn, DE (2024) www.bvse.de/themen/geschichte-des-textilrecycling/alttextilmarkt-2015-2016.html 🔴 17.10.2024.
- 22 Bos, P.: Regional projects: sorting, reuse and recycling of discarded textiles. In *The European Apparel & Textile Confederation (Hrsg.): Textile Flagships for Europe, TFE1 Textile Recycling Workshop 10–11 February 2015, Brussels, Euratex., EURATEX, Brussels (2015), 23 pages.*
- 23 Castens, S.: Weben auf den Kopf gestellt. *TEXTILplus* Ausgabe 07/08, Ausgabe 07/08 (2024), 12–13. ISSN 2296-1208.
- 24 Choudhury, K.; Tsianou, M. & Alexandridis, P.: Recycling of Blended Fabrics for a Circular Economy of Textiles: Separation of Cotton, Polyester, and Elastane Fibers. *Sustainability* 16,14 (2024), article no. 6206. ISSN 2071-1050. www.mdpi.com/2071-1050/16/14/6206.
- 25 Cura, K.; Rintala, N.; Kamppuri, T.; Saarimäki, E. & Heikkilä, P.: Textile Recognition and Sorting for Recycling at an Automated Line Using Near Infrared Spectroscopy. *Recycling* 6,1 (2021), article no. 11. ISSN 2313-4321. www.mdpi.com/2313-4321/6/1/11.
- 26 Dahlbom, M.; Aguilar Johansson, I. & Billstein, T.: Sustainable clothing futures – Mapping of textile actors in sorting and recycling of textiles in Europe. IVL Swedish Environmental Research Institute, IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm, SE, C736 (2023) ISBN 978-91-7883-469-3. www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1733211&dsid=4430 🔴 02.08.2024.
- 27 Damayanti, D.; Wulandari, L. A.; Bagaskoro, A.; Rianjanu, A. & Wu, H.-S.: Possibility Routes for Textile Recycling Technology. *Polymers* 13,21 (2021), article no. 3834. ISSN 2073-4360. www.mdpi.com/2073-4360/13/21/3834.
- 28 de la Motte, H. & Ostlund, A.: Sustainable Fashion and Textile Recycling. *Sustainability* 14,22 (2022), article no. 14903. ISSN 2071-1050. www.mdpi.com/2071-1050/14/22/14903.
- 29 Dietzel, Y.: Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) – mehr als ein Berichtsstandard. *TEXTILplus* Ausgabe 07/08, Ausgabe 07/08 (2024), 6–8. ISSN 2296-1208.
- 30 Duhoux, T.; Maes, E.; Hirschnitz-Garbers, M.; Peeters, K.; Asscherickx, L.; Christis, M.; Stubbe, B.; Colignon, P.; Hinzmann, M. & Sachdeva, A.: Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling – Final report. In European Commission; Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship & SMEs, (Hrsg.): *Publications Office, Brussels, BE (2021) ISBN 978-92-76-31368-7*. op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/739a1cca-6145-11ec-9c6c-01aa75ed71a1.
- 31 Dukovska-Popovska, I.; Kjellsdotter Ivert, L.; Jonsdottir, H.; Dreyer, C. H. & Kaipia, R.: The supply and demand balance of recyclable textiles in the Nordic countries. *Waste Management* 159 (2023), 154–162. ISSN 0956-053X. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X23000272.

- 32** Durrani, H.; Clarke-Sather, A. R. & Alves, P. H.T. F.: Prospective Life Cycle Assessment of Nonwoven Mat Manufacturing: Comparing Pre-Consumer Wood Waste Fibers to Post-Consumer Recycled Apparel Fibers. 29th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference (DFMLC), Volume 5: 29th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference (DFMLC) (2024), V005T05A020. ISBN 978-0-7918-8839-1. doi.org/10.1115/DETC2024-143955.
- 33** Dziubaniuk, O.; Ivanova-Gongne, M.; Kaipainen, J. & Nyholm, M.: Exploring the heuristics behind the transition to a circular economy in the textile industry. *Management Decision* 62 (2024), in press. ISSN 0025-1747. doi.org/10.1108/MD-06-2023-1095.
- 34** Eckert, Ronny: Neue Lösungen für das Textil-zu-Textil-Recycling. *ENTSORGA-Magazin* 42 (2023), 29–31. elibrary.vdi-verlag.de/10.51202/0933-3754-2023-6/entsorga-magazin-jahrgang-42-2023-heft-6?page=1.
- 35** European Union: System Circularity and Innovative Recycling of Textiles: Fact Sheet Project Information, online, Brussels, BE (2024) cordis.europa.eu/project/id/101003906 🔗 14.10.2024.
- 36** European Union: System Circularity and Innovative Recycling of Textiles: Results in Brief. Project Information, online, Brussels, BE (2024) cordis.europa.eu/article/id/453726-recycling-textiles-from-collection-to-retail 🔗 14.10.2024.
- 37** Fiorillo, C.; Trossaert, L.; Bezera, E.; Debie, S.; Ohnmacht, H.; Van Steenberge, P. H.M.; D'hooge, D. R. & Edeleva, M.: Molecular and material property variations during the ideal degradation and mechanical recycling of PET. *RSC Sustain. RSC*, 2,12 (2024), 3596–3637. dx.doi.org/10.1039/D4SU00485J.
- 38** Fohrer, N.; Mauter, S.; Rau, B. & Muschkiet, M.: Multimediales Handbuch zur textilen Aufbereitung und Verwertung. PDF-Handbuch, 126 Seiten, CTL Center Textillogistik an der Hochschule Niederrhein, Mönchengladbach, DE (2023) www.hs-niederrhein.de/fileadmin/bilder/Institute_und_Kompetenzzentren/CTL/Re3Tex_-_Multimediales_Handbuch.pdf 🔗 06.08.2024.
- 39** Fohrer, N.; Rau, B. & Muschkiet, M.: Leitfaden zur Rückführung von Textilien zur Reparatur und Verwertung. PDF-Handbuch, 81 Seiten, CTL Center Textillogistik an der Hochschule Niederrhein, Mönchengladbach, DE (2024) www.hs-niederrhein.de/fileadmin/dateien/Institute_und_Kompetenzzentren/CTL/RE3Tex_Leitfaden_zur_Rueckfuehrung_von_Textilien.pdf 🔗 06.08.2024.
- 40** Freericks, H.: Practical solutions for the production of quality yarns with recycled content in finishing. In Bremen Cotton Exchange, Fiber Institute Bremen, ITMF & IVGT (Hrsg.): ITSB International Textile Seminar Bremen 2024: Recycling of waste material along the textile processing chain, March 19, 2024, Bremen Cotton Exchange, Bremen, Germany., Bremen Cotton Exchange, Fiber Institute Bremen, ITMF & IVGT, Bremen, DE (2024), Presentation, 16 pp. textileseminar.com/itsb-2024-presentations/.
- 41** Gloy, Y.-S.; Gulich, B. & Hofmann, M.: Chapter 11: Textile Waste Management and Processing. In Matthes, A.; Beyer, K.; Cebulla, H.; Arnold, M. G. & Schumann, A. (Hrsg.): Sustainable Textile and Fashion Value Chains: Drivers, Concepts, Theories and Solutions., Springer International Publishing, Cham, DE (2021), 185–204. ISBN 978-3-030-22018-1. doi.org/10.1007/978-3-030-22018-1_11.
- 42** Gonzalez, V.; Lou, X. & Chi, T.: Evaluating Environmental Impact of Natural and Synthetic Fibers: A Life Cycle Assessment Approach. *Sustainability* 15,9 (2023), article no. 7670. ISSN 2071-1050. www.mdpi.com/2071-1050/15/9/7670.
- 43** Gulich, B.: Textilrecycling – Chancen und Möglichkeiten. In Faserinstitut Bremen e.V. & Bremer Baumwollbörse (organisier), (Hrsg.): 33rd International Cotton Conference Bremen, March 16th–18th, 2016., Bremen, DE 33 (2016), 40 pp. baumwollboerse.de/wp-content/uploads/2016/03/SV-Gulich-Recycling.pdf. Seen 🔗 31.03.2016.
- 44** Hall, C. A.; Goldsworthy, K. & R., Earley.: Design for sorting knitwear: Exploring blended textile wastes and the relationship between sorting, recovery, and recycled blending in yarn manufacture. *Materials Open Research* (2022) doi.org/10.12688/materialsopenres.17478.1.
- 45** Hammar, T.; Peñaloza, D. & Hanning, A. C.: Life cycle assessment of a circular textile value chain: the case of a garment made from chemically recycled cotton. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 29,10 (2024), 1880–1898. ISSN 1614-7502. doi.org/10.1007/s11367-024-02346-2.
- 46** Hasam, D.: Ermittlung und Systematisierung der Recyclingverfahren von Textilien hinsichtlich des Standes der Technik und aktueller Forschungsergebnisse. Universität Bremen, FB 4 Produktionstechnik, Universität Bremen, FB 4 Produktionstechnik, Bremen (2022)

- 47 Hutter, A.: Fibre recycling for a low impact textile value chain. In Bremen Cotton Exchange, Fiber Institute Bremen, ITMF & IVGT (Hrsg.): ITSB International Textile Seminar Bremen 2024: Recycling of waste material along the textile processing chain, March 19, 2024, Bremen Cotton Exchange, Bremen, Germany., Bremen Cotton Exchange, Fiber Institute Bremen, ITMF & IVGT, Bremen, DE (2024), Presentation, 19 pp. textileseminar.com/itsb-2024-presentations.
- 48 Hutter, A.: Fibre recycling for a low impact textile value chain. In Bremen Cotton Exchange, Fiber Institute Bremen, ITMF & IVGT (Hrsg.): ITSB International Textile Seminar Bremen 2024: Recycling of waste material along the textile processing chain, March 19, 2024, Bremen Cotton Exchange, Bremen, Germany., Bremen Cotton Exchange, Fiber Institute Bremen, ITMF & IVGT, Bremen, DE (2024), Presentation, 19 pp. textileseminar.com/itsb-2024-presentations.
- 49 Iezzi, B.; Shtein, M.; Wang, T. & Rothschild, M.: Fiber and Fabric-Integrated Tracing Technologies for Textile Sorting and Recycling. In Nasr, N. (Hrsg.): 18 Technology Innovation for the Circular Economy., John Wiley & Sons, Ltd, (2024), 223–237. ISBN 9781394214297. onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781394214297.ch18.
- 50 International Organization for Standardization ISO (ed.): Textiles – Environmental aspects – Vocabulary. International Organization for Standardization ISO, Geneva, CH, ISO 5157:2023-09 (2023)
- 51 Juanga-Labayen, J. P.; Labayen, I. V. & Yuan, Q.: A Review on Textile Recycling Practices and Challenges. Textiles 2,1 (2022), 174–188. ISSN 2673-7248. www.mdpi.com/2673-7248/2/1/10.
- 52 Karadayi-Usta, S.: Sustainable post-consumer textile waste management: Picture fuzzy set-based ORESTE approach. Journal of Cleaner Production 482 (2024), article no. 144231. ISSN 0959-6526. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624036801.
- 53 Krause, L.; Mrcic, K. & Partanen, A.: Fibre-to-fibre recycling. Bioplastics Magazine 19,6 (2024), 32–34. ISSN 1862-5258.
- 54 Kugler, G.; Fliescher, S.; Mörschel, U. & Liebold, F.: Charakterisierung von Recycling-Fasern – Teil 1. TEXTILplus Ausgabe 03/04, Ausgabe 03/04 (2023), 14–16. ISSN 2296-1208.
- 55 Lang, M.: Textilien: Zu kostbar zum Verbrennen. Klinik Einkauf 06,5 (2024), 39–41.
- 56 Langendorf, P.: Neue Geschäftsmodelle mit Cradle to Cradle®. In Sächsisches Textilforschungsinstitut e. V. (Hrsg. und Verantst.), (Hrsg.): Tagungsband 12. STFI-Kolloquium „recycling for textiles“, 2. und 3. Dezember 2015 im Günnewig Hotel "Chemnitzer Hof", Sächsisches Textilforschungsinstitut, Chemnitz., (2015), Vortrag, 31 Seiten.
- 57 Lanz, I. E.; Laborda, E.; Chaine, C. & Blecua, M.: A Mapping of Textile Waste Recycling Technologies in Europe and Spain. Textiles 4,3 (2024), 359–390. ISSN 2673-7248. www.mdpi.com/2673-7248/4/3/22.
- 58 Lederer, J. & Bartl, A.: Textilien und nachhaltige Entwicklungsziele. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 76,5 (2024), 262–271. ISSN 1613-7566. doi.org/10.1007/s00506-024-01033-8.
- 59 Lein, L. & Leis, J.: Themen, Trends und Perspektiven – Forschung im Bereich Recycling am STFI. TEXTILplus Ausgabe 07/08, Ausgabe 07/08 (2024), 18–21. ISSN 2296-1208.
- 60 Lu, L.; Fan, W.; Meng, X.; Xue, L.; Ge, S.; Wang, C.; Foong, S. Y.; Tan, C. S. Y.; Sonne, C.; Aghbashlo, M.; Tabatabaei, M. & Lam, S. S.: Current recycling strategies and high-value utilization of waste cotton. Science of The Total Environment 856, Part 1 (2023), article no. 158798. ISSN 0048-9697. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722058971.
- 61 Luiken, A.: TFE1 Resource Efficiency: Application of Sustainable Textile Materials of EU-origin. In The European Apparel & Textile Confederation (Hrsg.): Textile Flagships for Europe, TFE1 Textile Recycling Workshop 10–11 February 2015, Brussels, Euratex., EURATEX, Brussels (2015), 14 pages.
- 62 Malgueiro, R.; Durães, N.; Cunha, A.; Sepulveda, A.; Goth, A. & Peliteiro, B.: Functional fibres and coatings based on recycled PP from home textiles. In Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf DITF, Leibniz Institute for Interactive Materials DWI, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik ITM, (Hrsg.): Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference, Digital, November 09–10, 2021 – Book of Abstracts., Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf DITF, Stuttgart, DE, Stuttgart, DE (2021), 80. www.aachen-dresden-denkendorf.de/itc/teilnehmerbereich/ 29.11.2021.
- 63 Malinverno, N.; Schmutz, M.; Nowack, B. & Som, C.: Identifying the needs for a circular workwear textile management – A material flow analysis of workwear textile waste within Swiss Companies. Resources, Conservation and Recycling 189 (2023), article no. 106728. ISSN 0921-3449. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922005602.

- 64 Markarian, J.: Let's go round again: additives revive plastics. *Compounding World* October (2024), 45–53. ISSN 2053-7174. content.yudu.com/web/1rl19/0A1rl2p/CWOct24/html/index.html
🔗 04.10.2024.
- 65 Matthes, A.; Beyer, K.; Cebulla, H.; Arnold, M. G. & Schumann, A.: *Sustainable Textile and Fashion Value Chains: Drivers, Concepts, Theories and Solutions*. Springer International Publishing, Cham, DE (2021) ISBN 978-3-030-22018-1. doi.org/10.1007/978-3-030-22018-1.
- 66 Mayer, S.; Hebisch, R.; Csomor, A.; Gulich, B.; Gräfen, C.; Kraus, G.; Neumeister, L.; Linsel, G.; Ott, G.; Schmidt, I. & Siewert, E.: 16.3 Handlungsanleitung zum Schutz der Beschäftigten beim Recycling von Textilabfällen. In Quicker, P., Schnurer, H., Zeschmar-Lahl, B. (Hrsg.): *Müll-Handbuch*, Erich Schmidt Verlag, Berlin, DE, Band 3 (2010), Abschnitt 5132; 20 Seiten. www.muellhandbuch-digital.de/pos/2097/dokument.html. Laufend ergänzte Loseblattsammlung 🔗 22.11.2024.
- 67 Morell-Delgado, G.; Peiro, L. T. & Toboso-Chavero, S.: Revealing the management of municipal textile waste and citizen practices: The case of Catalonia *Science of The Total Environment* ELSEVIER, RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS 907 (2024), article no. 168093. ISSN 0048-9697.
- 68 Muringayil Joseph, T.; Azat, S.; Ahmadi, Z.; Moini Jazani, O.; Esmaeili, A.; Kianfar, E.; Haponiuk, J. & Thomas, S.: Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9 (2024), article no. 100673. ISSN 2666-0164. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016424000677.
- 69 Music, B.: Textile industry as a major source of microplastics in the environment. *Global Journal of Ecology* 8,2 (2023), 64–74. ISSN 2641-3094. www.agriscigroup.us/articles/GJE-8-184.php.
- 70 Muthu, S. S. (ed.): *Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing: Eco-friendly Raw Materials, Technologies, and Processing Methods*. Springer Singapore, Singapore (2014) ISSN 2197-9863. ISBN 978-981-287-065-0. doi.org/10.1007/978-981-287-065-0.
- 71 Mzikian, P.: SOEX Group Presentation. In *The European Apparel & Textile Confederation* (Hrsg.): *Textile Flagships for Europe*, TFE1 Textile Recycling Workshop 10–11 February 2015, Brussels, Euratex., EURATEX, Brussels (2015), 47 pages.
- 72 Naji, F.; Reinelt, B.; Schönemann, M.; Nordsieck, H.; Kroban, M.; Tronecker, D.; Dietz, W.; Albert, M.; Rommel, W.; Cherdron, B.; Krichel, A. & Schlichter, S.: Ökonomische Potenziale des Textilrecyclings und der Wasserstoffherzeugung aus Textilabfällen in Bayern. in Reihe: bifa-Text Nr. 73, bifa Umweltinstitut GmbH, Augsburg, DE, 73 (2023) ISSN 0944-5935. www.bifa.de/fileadmin/_migrated/pics/bifa-Texte/bifa-Text_Nr.73_Oekonomische_Potenziale_des_Textilrecyclings.pdf.
- 73 Nebel, K.: Recycling und Nachhaltigkeit bei Textilien und Faserverbunden: Sinn oder Unsinn? In *Sächsisches Textilforschungsinstitut e. V.* (Hrsg. und Verantst.), (Hrsg.): *Tagungsband 12. STFI-Kolloquium „recycling for textiles“*, 2. und 3. Dezember 2015 im Günnewig Hotel "Chemnitzer Hof", Sächsisches Textilforschungsinstitut, Chemnitz., (2015), Vortrag, 20 Seiten.
- 74 Nellström, M.: Automated sorting will increase textile recycling. Online article, Stockholm, SE (2022) www.ivl.se/english/ivl/our-offer/research-projects/circular-flows/automated-sorting-will-increase-textile-recycling.html 🔗 02.08.2024.
- 75 Nellström, M.: Automated sorting will increase textile recycling. Online article, Stockholm, SE (2022) www.ivl.se/english/ivl/our-offer/research-projects/circular-flows/automated-sorting-will-increase-textile-recycling.html 🔗 02.08.2024.
- 76 Piribauer, B.; Bartl, A. & Ipsmiller, W.: Enzymatic textile recycling – best practices and outlook. *Waste Management & Research* 39,10 (2021), 1277–1290. ISSN 0734-242X. doi.org/10.1177/0734242X211029167. PMID: 34238113.
- 77 Plakantonaki, S.; Kiskira, K.; Zacharopoulos, N.; Chronis, I.; Coelho, F.; Togiani, A.; Kalkanis, K. & Priniotakis, G.: A Review of Sustainability Standards and Ecolabeling in the Textile Industry. *Sustainability* 15,15 (2023), article no. 11589. ISSN 2071-1050. www.mdpi.com/2071-1050/15/15/11589.
- 78 Ramirez-Escamilla, H. G.; Martinez-Rodriguez, M. C.; Padilla-Rivera, A.; Dominguez-Solis, D. & Campos-Villegas, L. E.: Advancing Toward Sustainability: A Systematic Review of Circular Economy Strategies in the Textile Industry. *Recycling* 9,5 (2024), article no. 95. ISSN 2313-4321. www.mdpi.com/2313-4321/9/5/95.
- 79 Reike, D.; Hekkert, M. P. & Negro, S. O.: Understanding circular economy transitions: The case of circular textiles. *Business Strategy and the Environment* 32,3 (2023), 1032–1058. ISSN 0964-4733. onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bse.3114.

- 80 Ammar, R.; Vanhoeck, C.; Berlo, C. & Leite, D.: From Waste to Profit: Maximizing Textile Recycling with Design for Disassembly. A Comparative Cost Analysis of Disassembly Processes. Report, 61 pp., Resortecs, Brussels, BE (2023) resortecs-9343201.hs-sites.com/en/resortecs-from-waste-to-profit 🔗 14.10.2024.
- 81 Riba, Jordi-Roger; Cantero, Rosa; Canals, Trini & Puig, Rita: Circular economy of post-consumer textile waste: Classification through infrared spectroscopy. *Journal of Cleaner Production* 272 (2020), article no. 123011. ISSN 0959-6526. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620330560.
- 82 Ribul, M.; A., Lanot.; Tommencioni Pisapia, C.; Purnell, P.; McQueen-Mason, S. J. & Baurley, S.: Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *Journal of Cleaner Production* 326 (2021), article no. 129325. ISSN 0959-6526. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621035101.
- 83 Rittfors, J.: Thermochemical textile recycling – Investigation of pyrolysis and gasification of cotton and polyester. Chalmers University of Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, SE (2020) odr.chalmers.se/bitstreams/b2fe2eac-ba3c-4400-9718-0cf4f86ad13a/download.
- 84 Rodrigues, L.; Marques, R.; Dias, J. C.; Magalhaes, B.; Santos, A.; Amorim, C.; Carta, A. M.; Pinto, P. & Silva, C. J.: Added-Value of Cotton Textile Waste for Nonwoven Applications. *Textiles* 4,3 (2024), 309–327. ISSN 2673-7248. www.mdpi.com/2673-7248/4/3/18.
- 85 Roithner, C.; Weber, A. S.; Rechberger, H.; Bartl, A. & Ipsmiller, W.: *Beschreibung des Stands des Wissens zu Textilrecyclingtechnologien (SWiTex)*. Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement & Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, TU Wien, Wien, AT (2021). publik.tuwien.ac.at/files/publik_299479.pdf, gesehen 🔗 02.08.2024.
- 86 Rubik, F.; Nebel, K.; Klusch, C.; Karg, H.; Hecht, K.; Gerbig, M.; Gärtner, S. & Boldrini, B.: Textiles on the Path to Sustainability and Circularity – Results of Application Tests in the Business-to-Business Sector. *Sustainability* 16,14 (2024), article no. 5954. ISSN 2071-1050. www.mdpi.com/2071-1050/16/14/5954.
- 87 Saif, M.; Blay-Roger, R.; Zeeshan, M.; Bobadilla, L. F.; Reina, T. R.; Nawaz, M. A. & Odriozola, J. A.: Navigating the Legislative Interventions, Challenges, and Opportunities in Revolutionizing Textile Upcycling/Recycling Processes for a Circular Economy. *ACS Sustainable Resource Management* 1 (2024), in press. ISSN 2837-1445. doi.org/10.1021/acssusresmg.4c00242.
- 88 Sanchis-Sebastiá, M.; Novy, V.; Stigsson, L.; Galbe, M. & Wallberg, O.: Towards circular fashion – transforming pulp mills into hubs for textile recycling. *RSC Advances The Royal Society of Chemistry*, 11 (2021), 12321–12329. dx.doi.org/10.1039/D1RA00168J.
- 89 Sandberg, E. & Pal, R.: Exploring supply chain capabilities in textile-to-textile recycling? A European interview study. *Cleaner Logistics and Supply Chain* 11 (2024), article no. 100152. ISSN 2772-3909. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772390924000143.
- 90 Sander, M. & Kunath, P.: Besondere Anforderungen der Recyclingfaserverarbeitung an moderne Vliesstoffanlagen. In *Sächsisches Textilforschungsinstitut e. V. (Hrsg. und Verantst.)*, (Hrsg.): Tagungsband 12. STFI-Kolloquium „recycling for textiles“, 2. und 3. Dezember 2015 im Günnewig Hotel "Chemnitzer Hof", Sächsisches Textilforschungsinstitut, Chemnitz., (2015), Vortrag, 22 Seiten.
- 91 Schlapp-Hackl, I.; Rissanen, M.; Ojha, K.; Sawada, D.; Gorniak, K.; Onkinen, E.; Niinimäki, K. & Sixta, H.: From postconsumer cotton towels to new cotton textile fibers. *Journal of Applied Polymer Science* 141,23 (2024), article no. e55460. ISSN 0021-8995. onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.55460.
- 92 Schröder, S. E.; Christensen, U. L.; Hessellund, M.; Enevoldsen, A. L.; Mikkelsen, A. F. & Kristiansen, M.: Object detection and colour evaluation of multicoloured waste textiles using machine vision. *Proceedings of the 16th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments.*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (2023), 543?549. ISBN 9798400700699. doi.org/10.1145/3594806.3596583.
- 93 Schütt, C.: AUTEFA-Konzept für Recycling von Textilabfällen. In *Sächsisches Textilforschungsinstitut e. V. (Hrsg. und Verantst.)*, (Hrsg.): Tagungsband 12. STFI-Kolloquium „recycling for textiles“, 2. und 3. Dezember 2015 im Günnewig Hotel "Chemnitzer Hof", Sächsisches Textilforschungsinstitut, Chemnitz., (2015), Vortrag, 22 Seiten.
- 94 Sebastiá, M. S. & Wallberg, O.: Circular textiles research: Recycling technologies. *Open Access Government* April (2024), 370–371. www.openaccessgovernment.org/article/circular-textiles-research-recycling-technologies/173829/ 🔗 09.10.2024.

- 95 Shahid, M. A.; Hossain, M. T.; Habib, M. A.; Islam, S.; Sharna, K.; Hossain, I. & Mortuza Limon, M. G.: Prospects and challenges of recycling and reusing post-consumer garments: A review. *Cleaner Engineering and Technology* 19 (2024), article no. 100744. ISSN 2666-7908. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790824000247.
- 96 Sharkey, M. & Coggins, M.: The Invisible Barrier to Safe Textile Recycling. *Frontiers in Sustainability* 3 (2022), article no. 876683. ISSN 2673-4524. www.frontiersin.org/journals/sustainability/articles/10.3389/frsus.2022.876683.
- 97 Shiddique, M. N.A.; Islam, K.; Islam, T.; Hosen, M. D.; Islam, M. A.; Islam, M. I.; Bashar, M. M. & Bhat, G.: Bio-Based Packaging Materials from Post-Consumer Cotton Textiles. *Advances in Polymer Technology* 2024,1 (2024), article no. 5652311, in press. ISSN 0730-6679. onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2024/5652311.
- 98 Singhal, S.; Agarwal, S. & Singhal, N.: Chemical recycling of waste clothes: a smarter approach to sustainable development. *Environmental Science and Pollution Research* 30,19 (2023), 54448–54469. ISSN 1614-7499. doi.org/10.1007/s11356-023-26438-y.
- 99 Steinbach, U.: Aufbereitung und Verwertung von Randbeschnittabfällen aus der Polyester-Spinnvliesproduktion. In Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (Hrsg. und Verantst.), (Hrsg.): Tagungsband 12. STFI-Kolloquium „recycling for textiles“, 2. und 3. Dezember 2015 im Günnewig Hotel "Chemnitzer Hof", Sächsisches Textilforschungsinstitut, Chemnitz., (2015), Vortrag, 17 Seiten.
- 100 Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (Hrsg. und Verantst.): Tagungsband 11. STFI-Kolloquium „recycling for textiles“, 4. und 5. Dezember 2013 im Günnewig Hotel "Chemnitzer Hof". Sächsisches Textilforschungsinstitut, Chemnitz., (2013), 39 Seiten.
- 101 Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (Hrsg. und Verantst.): Tagungsband 12. STFI-Kolloquium „recycling for textiles“, 2. und 3. Dezember 2015 im Günnewig Hotel "Chemnitzer Hof". Sächsisches Textilforschungsinstitut, Chemnitz., (2015), 37 Seiten.
- 102 Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (Hrsg. und Verantst.): Tagungsband 13. STFI-Kolloquium „recycling for textiles“, 6. und 7. Dezember 2017 im Hotel "Chemnitzer Hof", Chemnitz. Sächsisches Textilforschungsinstitut, Chemnitz., (2017), 57 Seiten.
- 103 Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (Hrsg. und Verantst.): Tagungsband 14. STFI-Kolloquium „recycling for textiles“, 4. und 5. Dezember 2019 im Hotel "Chemnitzer Hof", Chemnitz. Sächsisches Textilforschungsinstitut, Chemnitz., (2019), 40 Seiten.
- 104 Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (Hrsg. und Verantst.): Tagungsband 15. STFI-Kolloquium „recycling for textiles“, 17. und 18. Mai 2022 im Hotel "Chemnitzer Hof", Chemnitz. Sächsisches Textilforschungsinstitut, Chemnitz., (2022), 40 Seiten.
- 105 Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (Hrsg. und Verantst.): Tagungsband 16. STFI-Kolloquium „recycling for textiles“, 6. und 7. Dezember 2023 im Hotel "Chemnitzer Hof", Chemnitz. Sächsisches Textilforschungsinstitut, Chemnitz., (2023), 40 Seiten.
- 106 Stubbe, B.; Van Vrekhem, S.; Huysman, S.; Tilkin, R. G.; De Schrijver, I. & Vanneste, M.: White Paper on Textile Fibre Recycling Technologies. *Sustainability* 16,2 (2024), article no. 618. ISSN 2071-1050. www.mdpi.com/2071-1050/16/2/618.
- 107 Tang, K. H.D.: State of the Art in Textile Waste Management: A Review. *Textiles* 3,4 (2023), 454–467. ISSN 2673-7248. www.mdpi.com/2673-7248/3/4/27.
- 108 Thiebat, F.; Fregonara, E.; Masoero, A.; Morselli, F.; Senatore, C. & Giordano, R.: Circular Design for Natural Fibers: A Literature Review on Life Cycle Evaluation Approaches for Environmental, Social and Economic Sustainability. *Preprints* (2024), article no. 2024091930. doi.org/10.20944/preprints202409.1930.v1.
- 109 Thielen, A.: Enzymes – the future of fibre-to-fibre recycling? *Bioplastics Magazine* 19,5 (2024), 44–45. ISSN 1862-5258.
- 110 Tischberger-Aldrian, A.; Stipanovic, H.; Kuhn, N.; Bäck, T.; Schwartz, D. & Koinig, G.: Automatisierte Textilsortierung – Status quo, Herausforderungen und Perspektiven. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 76,1 (2024), 63–79. ISSN 1613-7566. doi.org/10.1007/s00506-023-01004-5.
- 111 Tomovic, T.: Farbe als Herausforderung im Textilrecycling. In Augsten, A.; Frye, A.; Wölfel, C. & Köck, M. (Hrsg.): *Design × Nachhaltigkeit. Jahrestagung der DGTF 2022*. Kiel, 2. Juni–3. Juni 2022., Deutsche Gesellschaft für Designtheorie und -forschung e.V., Berlin, DE (2022), 68–71. [tud.qucosa.de/landing-page/?tx_dlf\[id\]=https%3A%2F%2Ftud.qucosa.de%2Fapi%2Fqucosa%253A79671%2Fmets](https://tud.qucosa.de/landing-page/?tx_dlf[id]=https%3A%2F%2Ftud.qucosa.de%2Fapi%2Fqucosa%253A79671%2Fmets).

- 112** Turuc, A.: Textilrecycling – Probleme und Lösungsansätze. PDF, 23 Seiten, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Wiesbaden, DE (2020) www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/abfall/ressourcenschutz/Textilien/Alttextilien_endversion.pdf 🔗 17.10.2024.
- 113** Uddin, A. J. & Rahaman, M.: A greener approach to transform consumer-waste recycled fibers into grindle yarn employing 2-ply compact-Siro spinning. Research Square (2024), PREPRINT (Version 1). doi.org/10.21203/rs.3.rs-4029365/v1.
- 114** Vaishali, M.; Gopal, S. & Sreeram, K. J.: A facile approach towards recycling of polyurethane coated PET fabrics. RSC Sustain. RSC, 2,8 (2024), 2324–2334. dx.doi.org/10.1039/D4SU00136B.
- 115** Vera, R. E.; Zambrano, F.; Suarez, A.; Pifano, A.; Marquez, R.; Farrell, M.; Ankeny, M.; Jameel, H. & Gonzalez, R.: Transforming textile wastes into biobased building blocks via enzymatic hydrolysis: A review of key challenges and opportunities. Cleaner and Circular Bioeconomy 3 (2022), article no. 100026. ISSN 2772-8013. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772801322000227.
- 116** Vogel, G.: Product recovery and recycling. In Bremen Cotton Exchange, Fiber Institute Bremen, ITMF & IVGT (Hrsg.): ITSB International Textile Seminar Bremen 2024: Recycling of waste material along the textile processing chain, March 19, 2024, Bremen Cotton Exchange, Bremen, Germany., Bremen Cotton Exchange, Fiber Institute Bremen, ITMF & IVGT, Bremen, DE (2024), Presentation, 18 pp. textileseminar.com/itsb-2024-presentations/.
- 117** Vonbrühl, L.: Separation of elastane from textiles. Bioplastics Magazine 19,5 (2024), 38–39. ISSN 1862-5258.
- 118** Wojciechowska, M. & Kowaluk, G.: Challenges and Opportunities in Recycling Upholstery Textiles: Enhancing High-Density Fiberboards with Recycled Fibers. Preprints, (2024), in press. doi.org/10.20944/preprints202407.2220.v1.
- 119** Wojnowska-Baryla, I.; Bernat, K.; Zaborowska, M. & Kulikowska, D.: The Growing Problem of Textile Waste Generation? The Current State of Textile Waste Management. Energies 17,7 (2024), article no. 1528. ISSN 1996-1073. www.mdpi.com/1996-1073/17/7/1528.
- 120** Webseite OpenCorporates | The Open Database Of The Corporate World | Suche „Textilrecycling“. [OpenCorporates.com/companies?commit=Go&order=&page=2&q=textilrecycling&type=companies&utf8=%E2%9C%93](https://opencorporates.com/companies?commit=Go&order=&page=2&q=textilrecycling&type=companies&utf8=%E2%9C%93) 🔗 22.11.2024.
- 121** Webseite Dow Jones FACTIVA. global.factiva.com/sb/default.aspx?lnep=hp 🔗 22.11.2024.
- 122** Webseite des Fachverband Textilrecycling im Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V., Bonn, DE | Mitgliedersuche: www.bvse.de/mitgliedersuche/alle.html 🔗 17.10.2024.
- 123** Gulich, B. & Schilde, W.: ITMA 2015 Maschinenbau für Recycling und Vliesstoffe. In Sächsisches Textilforschungsinstitut e. V. (Hrsg. und Verant.): Tagungsband 12. STFI-Kolloquium „recycling for textiles“, 2. und 3. Dezember 2015 im Günnewig Hotel „Chemnitzer Hof“. Sächsisches Textilforschungsinstitut, Chemnitz (2015), Vortrag, 39 Seiten.
- 124** Engel, P.: ITMA-Rückblick Vliesstofftechnologien. In Sächsisches Textilforschungsinstitut e. V. (Hrsg. und Verant.): Tagungsband 16. STFI-Kolloquium „recycling for textiles“, 6. und 7. Dezember 2023 im Hotel „Chemnitzer Hof“, Chemnitz. Sächsisches Textilforschungsinstitut, Chemnitz (2023), 40 Seiten.

Impressum

Herausgeberin

© 11/2025 Stiftung GRS Batterien

Gotenstraße 14, 20097 Hamburg

November 2025

Autor*innen



Faserinstitut Bremen

Holger Fischer ✉ fischer@faserinstitut.de

Johanne Neuhof ✉ neuhof@faserinstitut.de

Axel Drieling



GRS PRO
Textil

Gemeinsames Rücknahmesystem Servicegesellschaft mbH

Dr. Julia Hobohm ✉ hobohm@grs-pro.de

Lea Kirstein ✉ kirstein@grs-pro.de

Gestaltung

webersupiran.berlin