



bifa-Text Nr. 73

# Ökonomische Potenziale des Textilrecyclings und der Wasserstoffherzeugung aus Textilabfällen in Bayern

Dr.-Ing. Fatah Naji, Birgit Reinelt, Michael Schönemann, Hermann Nordsieck, Dr. Malgosia Kroban, Dr. Dieter Tronecker, Dr. Wolfram Dietz, Moritz Albert, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rommel (bifa Umweltinstitut GmbH)

Bettina Cherdron, Amon Krichel, Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlichter (ITA)

Gefördert von:

Bayerisches Staatsministerium für  
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie



Kooperationspartner:



**Impressum**

Alle Rechte (insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung) sind vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Kein Teil der bifa-Texte darf in irgendeiner Form ohne Genehmigung der Herausgeber reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

**Herausgeber**

bifa Umweltinstitut GmbH  
Am Mittleren Moos 46  
86167 Augsburg

**Verfasser**

Dr.-Ing. Fatah Najj, Birgit Reinelt, Michael Schönemann, Hermann Nordsieck, Dr. Malgosia Kroban, Dr. Dieter Tronecker, Dr. Wolfram Dietz, Moritz Albert, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rommel (bifa Umweltinstitut GmbH)

Bettina Cherdron, Amon Krichel, Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlichter (ITA)

Gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie,  
Verband der Bayerischen Textil- und Bekleidungsindustrie e.V. und Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V.

In Kooperation mit ITA (Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH)

1. Auflage 2023  
© bifa Umweltinstitut GmbH





**bifa-Text Nr. 73**

# **Ökonomische Potenziale des Textilrecyclings und der Wasserstoffherzeugung aus Textilabfällen in Bayern**

**Dr.-Ing. Fatah Naji, Birgit Reinelt, Michael Schönemann, Hermann Nordsieck, Dr. Malgosia Kroban, Dr. Dieter Tronecker, Dr. Wolfram Dietz, Moritz Albert, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rommel (bifa Umweltinstitut GmbH)**

**Bettina Cherdron, Amon Krichel, Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlichter (ITA)**



# INHALTSVERZEICHNIS

## Abbildungsverzeichnis

## Tabellenverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Rahmenbedingungen und Ziele dieser Studie</b> .....	<b>10</b>
2.1	Nationale und internationale Rahmenbedingungen.....	10
2.2	Ziele und Aufbau dieser Studie .....	14
<b>3</b>	<b>Textile Rohstoffe und Wertschöpfungskette</b> .....	<b>17</b>
3.1	Textile Rohstoffe .....	17
3.2	Produktionsmengen textiler Fasern.....	22
3.2.1	Produktionsmengen Textilien.....	22
3.2.2	Produktionsmengen Textil- und Chemiefasern.....	24
3.3	Verfahrenstechnik und Herstellungsprozesse von Textilien .....	27
3.4	Energieaufwand bei der Herstellung von Primärtextilien .....	32
3.5	Wirtschaftliche Entwicklung der Textil- und Bekleidungsindustrie in Bayern.....	33
<b>4</b>	<b>Textilabfallaufkommen</b> .....	<b>38</b>
4.1	Textilabfälle weltweit .....	38
4.2	Textilabfälle im Restabfall in Deutschland und Bayern .....	41
4.2.1	Literaturbetrachtung: Textilanteile in Restabfall.....	42
4.2.2	Restabfall-Sortieranalysen der bifa Umweltinstitut GmbH.....	43
4.2.3	Im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt durchgeführte Sortieranalysen .....	44
4.2.4	Auswertung weiterer veröffentlichter Sortieranalyseberichte.....	44
4.2.5	Daten aus den Veröffentlichungen des Umweltbundesamtes .....	45
4.2.6	Zusammenfassung textile Abfälle im Restabfall .....	46
4.3	Getrennte Sammlung von Textilien in Deutschland und Bayern.....	47
4.3.1	Sammelmenge getrennt erfasster Textilien .....	48
4.3.2	Sortierung getrennt erfasster Textilien.....	56
4.3.3	Weiterverwertung getrennt erfasster Textilien .....	57
4.4	Aufkommen textiler Bodenbeläge in Deutschland und Bayern.....	60
4.4.1	Sammelmengen textiler Bodenbeläge im Sperrmüll.....	61
4.4.2	Verwertungsmöglichkeiten textiler Bodenbeläge.....	61
4.4.3	Zusammensetzung textiler Bodenbeläge.....	62
4.5	Zusammenfassung Textilabfallaufkommen in Bayern.....	63

<b>5</b>	<b>Zusammensetzung und Brennstoffeigenschaften von Textilabfällen aus der gewerblichen Altkleidersammlung</b> .....	<b>66</b>
5.1	Analyse des Untersuchungsgebietes Augsburg.....	66
5.2	Vorgehensweise bei der Probenahme und Sortieranalyse .....	67
5.3	Auswertung .....	72
5.4	Brennstoffeigenschaften des Textilabfalls .....	74
<b>6</b>	<b>Status quo zur Verfahrenstechnik des Textilrecyclings</b> .....	<b>77</b>
6.1	Verfahren zum Recycling von Textilien.....	77
6.2	<b>Werkstoffliche Recyclingverfahren</b> .....	<b>82</b>
6.2.1	Mechanisches Recycling .....	82
6.2.2	Lösemittelbasierte Trennung .....	83
6.2.3	Thermomechanisches Recycling .....	85
6.3	<b>Rohstoffliches Recycling</b> .....	<b>86</b>
6.3.1	Chemisches Recycling.....	86
6.3.2	Thermochemisches Recycling .....	87
6.3.3	Thermische Verwertung.....	88
6.4	<b>Forschungsstand zu Recyclingvorhaben</b> .....	<b>89</b>
6.4.1	Mechanisches Recycling und Verarbeitung rezyklierter Fasern zu Garnen.....	89
6.4.2	Chemisches Recycling.....	90
6.4.3	Recycling von Alttextilien .....	91
6.5	<b>Ökonomische Bewertung der Verwertungsoptionen von Sekundärfasern</b> .....	<b>93</b>
6.6	<b>Bedeutung des Textilrecyclings für Bayern</b> .....	<b>98</b>
<b>7</b>	<b>Mengenpotenzial von Wasserstoff aus Textilabfällen</b> .....	<b>100</b>
7.1	Zukünftiger Wasserstoffbedarf in Bayern .....	100
7.2	Theoretisches Wasserstoffpotenzial von Textilabfällen.....	102
7.3	Produktionskosten für die Wasserstoffherzeugung .....	104
7.4	Bewertung des Wasserstoffpotentials von Textilabfällen .....	106
<b>8</b>	<b>Analyse von Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff aus Textilien</b> .....	<b>108</b>
8.1	Begriffsbestimmung .....	108
8.2	Technologie und Varianten der Vergasung .....	108
8.3	Vergasungsarten für Textilabfälle .....	112
8.4	Vergasung von Synthesefasern .....	113
8.5	Wasserstoffausbeute.....	114
8.6	Produkte der Vergasung .....	115

<b>8.7</b>	<b>Literaturrecherche zu Vergasung von Textilabfällen</b> .....	<b>116</b>
8.7.1	Patent CN104479758A – Gasification method of waste textile fabrics .....	116
8.7.2	Valorisation of textile waste via steam gasification in a fluidized bed reactor .....	116
8.7.3	Oxygen Gasification of Municipal Solid Waste in a Fixed-Bed Gasifier .....	117
<b>8.8</b>	<b>Vergasungsverfahren für Abfälle</b> .....	<b>118</b>
8.8.1	Ebara Ube Process .....	118
8.8.2	InEnTec / Plagazi .....	120
8.8.3	Enerkem .....	121
8.8.4	Sierra Energy .....	122
8.8.5	Dual Fluidized Bed (DFB) .....	123
<b>8.9</b>	<b>Investitions- und Betriebskosten</b> .....	<b>126</b>
<b>9</b>	<b>Konzept für die Wasserstoffherzeugung aus Textilabfällen</b> .....	<b>129</b>
<b>9.1</b>	<b>Thermochemische Umsetzung</b> .....	<b>129</b>
9.1.1	Vorbehandlung .....	131
9.1.2	Abkühlen des Produktgases .....	133
9.1.3	Gasreinigung (Partikelabtrennung und Abtrennung von HCl und HF) .....	133
9.1.4	Erhöhung der Wasserstoffanteils .....	134
9.1.5	Dampfreformierung .....	135
9.1.6	Abtrennung von sauren Bestandteilen (CO <sub>2</sub> ), Schwefelverbindungen und sonstigen Verunreinigungen .....	135
9.1.7	Reinigung des Wasserstoffs .....	137
9.1.8	Prozessbeschreibung (theoretisches Anlagenkonzept) .....	138
<b>9.2</b>	<b>Machbarkeit</b> .....	<b>140</b>
9.2.1	Technische Machbarkeit .....	140
9.2.2	Wirtschaftliche Machbarkeit .....	140
9.2.3	Herausforderungen .....	143
9.2.4	Eingliederung der Vergasungstechnologie ins Textilrecycling .....	144
<b>10</b>	<b>Analyse zur Textilsammlung und Logistik</b> .....	<b>145</b>
<b>10.1</b>	<b>Logistikanalyse</b> .....	<b>145</b>
10.1.1	Altkleidersammlung .....	145
10.1.2	Entsorgungsfachbetriebe für Textilabfälle .....	146
10.1.3	Textilhersteller und -veredler .....	149
10.1.4	Abgleich der Standorte der Herstellung und der Entsorgung .....	150
<b>10.2</b>	<b>Standortuntersuchung</b> .....	<b>151</b>
<b>11</b>	<b>Ausblick: Recycling-Hub Augsburg</b> .....	<b>153</b>
<b>11.1</b>	<b>Umsetzung Kompetenzzentrum</b> .....	<b>153</b>
<b>11.2</b>	<b>Standortbewertung Augsburg</b> .....	<b>155</b>

<b>11.3</b>	<b>Umsetzungsperspektiven .....</b>	<b>157</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>160</b>
<b>13</b>	<b>Danksagung.....</b>	<b>170</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Nachhaltigkeitsziele [UN_SDG].....	11
Abbildung 2-2:	Der Europäische Grüne Deal [EU GreenDeal].....	12
Abbildung 2-3:	Abfallhierarchie [bonnorange 2022].....	13
Abbildung 3-1:	Halbmechanischer Handwebstuhl mit Schützen, ca. 1948.....	17
Abbildung 3-2:	Übersicht Ursprung Faserarten [Bildquelle: Bettina Cherdron].....	19
Abbildung 3-3:	Einteilung cellulosische Chemiefasern.....	20
Abbildung 3-4:	Einteilung synthetische Chemiefasern.....	21
Abbildung 3-5:	Einteilung Textilien mit Beispielen.....	23
Abbildung 3-6:	Übersicht Anteile Produktionsmenge von Textilien in der EU [Euratex 2022].....	24
Abbildung 3-7:	Produktionsmenge Textilfasern weltweit [Statista Produktionsmengen, 2022].....	25
Abbildung 3-8:	Verteilung Anteile Faserarten an Gesamtmenge weltweit [Statista Anteil Faserarten, 2022].....	25
Abbildung 3-9:	Verteilung Anteile Naturfasern.....	26
Abbildung 3-10:	Verteilung Anteile Chemiefasern.....	26
Abbildung 3-11:	Erntemengen in Millionen Baumwollballen, ca. 218 kg/pro Baumwollballen,.....	27
Abbildung 3-12:	Darstellung vom Faserkneuel über das Spinnen zur textilen Fläche.....	28
Abbildung 3-13:	Schematische Darstellung von den Fasern zur textilen Fläche.....	28
Abbildung 3-14:	Schema der textilen Verarbeitungskette.....	30
Abbildung 3-15:	Überblick Beispiele Textilveredlung.....	31
Abbildung 3-16:	Beschäftigte der bayerischen Textil- und Bekleidungsindustrie [IndBer, 2022].....	35
Abbildung 3-17:	Umsatz bayerische Textilindustrie [IndBer, 2022].....	35
Abbildung 3-18:	Umsatz bayerische Bekleidungsindustrie [IndBer, 2022].....	36
Abbildung 3-19:	Umsatz deutsche Textil- und Bekleidungsindustrie [Statista Umsatz, 2022].....	36
Abbildung 3-20:	Beschäftigte deutsche Textil- und Bekleidungsindustrie [Statista Textil, 2022].....	37
Abbildung 4-1:	Weltweite Materialströme für Bekleidung im Jahr 2015.....	39
Abbildung 4-2:	Schätzwerte der Mengen deponierter Textilien im Jahr 2016 in [kg/(Ew*a)].....	39
Abbildung 4-3:	Textile Abfallströme in Deutschland.....	42
Abbildung 4-4:	Sammelsysteme für Bekleidung und Heimtextilien in Deutschland für das Jahr 2018 [UBA 2022].....	47
Abbildung 4-5:	Verlauf der Alttextil-Sammelmengen in Augsburg als Anteil der Jahresmenge.....	50
Abbildung 4-6:	Übersicht Inlandsverfügbarkeit bvse und Ergebnis neue Parameter [UBA2022].....	54
Abbildung 4-7:	Verwertungswege von getrennt gesammelten Alttextilien [BVSE, 2020].....	57
Abbildung 4-8:	Textilien sortiert für die thermische Verwertung [Texaid].....	59
Abbildung 4-9:	Verkaufsmengen von Teppichen in Deutschland im Jahr 2016 [ECRA 2021].....	60
Abbildung 4-10:	Textile Abfallströme in Bayern.....	64
Abbildung 5-1:	Übersichtskarte der Augsburger Stadtbezirke und Planungsräume (links) sowie Wohnberechtigte Bevölkerung pro Hektar bewohnter Fläche (rechts). Strukturatlas der Stadt Augsburg 2021.....	67
Abbildung 5-2:	Standorte der Altkleider-Sammelcontainer in Augsburg.....	68
Abbildung 5-3:	Zuführtransportband, Detektionseinheit und Monitor der NIR-Anlage.....	70
Abbildung 5-4:	Sortierstation, NIR-Anlage und Materialfraktionen.....	70

Abbildung 5-5:	Ergebnis der Sortieranalyse (Sortierfraktionen in Hauptgruppen zusammengefasst) .....	72
Abbildung 5-6:	Detailliertes Ergebnis der Sortieranalyse für Probe 1 und Probe 2.....	73
Abbildung 5-7:	Sortierergebnis als arithmetische Mittelwerte über beide Proben .....	74
Abbildung 6-1:	Abbildung Stoffstrom textile Kette .....	77
Abbildung 6-2:	Darstellung Übersicht Recyclingverfahren .....	78
Abbildung 6-3:	Routen verschiedener Recyclingverfahren.....	80
Abbildung 6-4:	Mögliche Wege Chemischer Verfahren im Textilrecycling [Damayanti 2021].....	87
Abbildung 6-5:	Entscheidungswege der Recyclingrouten .....	95
Abbildung 7-1:	Nationaler Wasserstoffbedarf in TWh für die Sektoren Energie, Gebäude, Industrie und Verkehr nach Studien vom Forschungszentrum Jülich (2020) und von Agora (2021) .....	101
Abbildung 7-2:	Produktion von Wasserstoff: Kosten und Kostentrends [Bukold, 2020].....	104
Abbildung 7-3:	Aufteilung des Wasserstoffs nach „Farben“ .....	105
Abbildung 8-1:	Allgemeiner Prozessablauf für die Produktion von Wasserstoff durch Vergasung.....	109
Abbildung 8-2:	Einteilung der Vergasungsverfahren .....	110
Abbildung 8-3:	Sankey-Diagramm der Massenströme eines 10 MW-DFB-Vergasers; Ströme in kg/h (TG=tail gas) [Loiperböck, 2018] .....	110
Abbildung 8-4:	Vereinfachte Darstellung der thermochemischen Umsetzung mit Eingliederung der partiellen Oxidation, autothermen Reformierung und Dampfreformierung [eigene Darstellung angelehnt an Mosinska 2020] .....	112
Abbildung 8-5:	Synthesegas-Verwertungswege zur Herstellung von chemischen Grundstoffen [Lechleitner, 2019] .....	115
Abbildung 8-6:	Einsatzmaterial Ebara Ube Anlage; links: Plastikballen bei Anlieferung, mitte: Extruder, rechts: Plastikbriketts [Quicker, 2019].....	118
Abbildung 8-7:	Ebara Ube Process Pressurized twin internally circulating fluidized-bed gasification system [Ebara, 2022].....	120
Abbildung 8-8:	InEntec Vergasungstechnologie [InEntec, 2022].....	121
Abbildung 8-9:	Energkem Vergasungstechnologie [Energkem, 2022] .....	122
Abbildung 8-10:	FastOx-Vergasungstechnologie von Sierra Energy [Sierra Energy, 2022] .....	123
Abbildung 8-11:	DFB-Prozessschema für die Produktion von Wasserstoff aus Biomasse [Loipersböck, 2018] .....	124
Abbildung 8-12:	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines DFB-Vergasers mit 100 MW Leistung [nach Kraussler 2018]. Input 164.000 t Hackschnitzel pro Jahr. ....	127
Abbildung 8-13:	Betriebsergebnis in Abhängigkeit vom Rohstoffpreis bei einem 100 MW DFB Vergaser (eigene Berechnung mit Daten aus Kraussler, 2018).....	127
Abbildung 9-1:	Vorbehandlungsschritte in Abhängigkeit vom verwendeten Verfahren; in heller Farbe Vorbehandlungsschritte, die nur evtl. notwendig sind.....	133
Abbildung 9-2:	Vereinfachte Darstellung einer Anlage zur Herstellung von Wasserstoff aus Textilabfällen.....	139
Abbildung 9-3:	Typische Investitionskosten (%) einer 200 kt/a Methanolproduktionsanlage, mit Kohlevergasung (WGS = Wassergasshift) [eigene Darstellung nach Lui 2010].....	141
Abbildung 9-4:	Langfristige Preisprognose für Wasserstoff (H <sub>2</sub> ) nach BNEF 2020.....	143
Abbildung 10-1:	Hochrechnung der Verteilung des Altkleideraufkommens innerhalb Bayerns .....	145

Abbildung 10-2: Standorte von Entsorgungsfachbetrieben mit einer abfallrechtlichen Genehmigung für alle Arten von Textilabfällen in den Abfallschlüsselbereichen: 04, 15, 19 oder 20.....	147
Abbildung 10-3: Standorte von Textilunternehmen mit potenziellem Produktionsrestaufkommen.....	150
Abbildung 10-4: Gegenüberstellung der räumlichen Verteilung von Standorten zur Herstellung und Entsorgung von Textilien innerhalb Bayerns.....	151
Abbildung 10-5: Fahrstreckenoptimierte Standortzuweisung von Textilabfallproduzenten auf Entsorgungsfachbetriebe für Textilien.....	152
Abbildung 11-1: Recycling Atelier Augsburg.....	156
Abbildung 11-2: Recycling Hub.....	158

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Einteilung Fasern nach DIN 60 001, ISO 2076 und ISO 6938.....	18
Tabelle 3-2: Faserarten und ihr Energieaufwand bei der Herstellung.....	33
Tabelle 4-1: Verbrauch und getrennte Sammlung von Alttextilien in der EU [JRC, 2021].....	40
Tabelle 4-2: Ergebnisse der ausgewerteten Sortieranalysen [Datenpool bifa (2022)].....	43
Tabelle 4-3: Ergebnisse ausgewählter Sortieranalysen des Bayerischen Landesamts für Umwelt.....	44
Tabelle 4-4: Quellen und Ergebnisse der ausgewerteten Sortieranalysen.....	45
Tabelle 4-5: Alttextilien im Hausmüll.....	46
Tabelle 4-6: Ergebnisse der Reststoffanalysen nach Quellen.....	46
Tabelle 4-7: Gesondert erfasste Alttextilien der Bundesländer nach Abfallbilanzen.....	49
Tabelle 4-8: Gesondert gesammelte Alttextilien im Jahr 2018.....	50
Tabelle 4-9: Angepasste Mengen der Grundmethode [UBA2022].....	52
Tabelle 4-10: Angepasste Mengen der Konsummethode [BVSE 2020 UBA 2020].....	53
Tabelle 4-11: Angepasste Mengen der Verbrauchsmethode [UBA, 2022].....	53
Tabelle 4-12: Vergleich tatsächliche Sammelmenge BVSE und Umweltbundesamt [BVSE 2020; UBA, 2022].....	55
Tabelle 4-13: Gesondert gesammelte Alttextilien im Jahr 2018 [UBA 2022].....	56
Tabelle 4-14: Gesondert gesammelte Alttextilien im Jahr 2018.....	58
Tabelle 4-15: Zusammensetzung Fasermaterial Teppiche in Nutz und Mittelschicht (45% des Gesamtgewichts) [ECRA 2021].....	62
Tabelle 4-16: Zusammensetzung Trägerschicht Teppiche 55% des Gesamtgewichts [ECRA2021].....	63
Tabelle 5-1: Sortierkatalog.....	71
Tabelle 5-2: Brennstoffeigenschaften des Textilgemisches.....	75
Tabelle 5-3: Ascheanalyse einer Textilprobe.....	76
Tabelle 6-1: Technologiereifegrad der betrachteten Recyclingverfahren.....	82
Tabelle 6-2: SWOT-Analyse Mechanisches Recycling.....	83
Tabelle 6-3: SWOT-Analyse Lösemittelbasiertes Recycling.....	84
Tabelle 6-4: SWOT-Analyse Thermomechanisches Recycling.....	85
Tabelle 6-5: SWOT-Analyse Chemische Recyclingverfahren.....	88
Tabelle 6-6: SWOT-Analyse Thermische Verwertung.....	89
Tabelle 6-7: Übersicht Bewertung Recyclingverfahren aus textiler Sicht.....	94

Tabelle 6-8: Rechenbeispiel Garnkosten aus Primär- und Sekundärbaumwollfasern [ITA,2022].....	97
Tabelle 7-1: Prognose des Wasserstoffbedarfs in Bayern in TWh/a .....	102
Tabelle 7-2: Theoretisches Potenzial verschiedener Textilfasern.....	103
Tabelle 8-1: Ausbeute an CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> und CH <sub>4</sub> in Vol-% bei der Vergasung von Polyester und Baumwolle bei verschiedenen Temperaturen [Rittfors 2020].....	117
Tabelle 8-2: DFB-Vergaser [IEA Bioenergy 2019] .....	125
Tabelle 8-3: Geschätzte Produktionskosten für Biomethan bei der Nutzung von Abfällen aus der Fortwirtschaft [Thunmann, 2019].....	128
Tabelle 9-1: Produktgas-Reinigungsverfahren [Lui, 2010].....	136
Tabelle 9-2: Verfahrensschritte mit Technologiereifegrad (TRL) .....	140
Tabelle 10-1: Anzahl der bayerischen Entsorgungsfachbetriebe nach Genehmigungsstatus .....	148
Tabelle 10-2: Verfahren an Standorten der bayerischen Entsorgungsfachbetriebe zum Umgang mit Textilabfällen .....	149

# 1 Zusammenfassung

- Die Textilindustrie zählt zu den **wichtigsten Konsumgüterindustrien** und muss zukünftig im Fokus sinnvoller Recyclingansätze stehen.
- **Hauptrohstoffe** sind Polyester, cellulosische Chemiefasern und Baumwolle.
- Der **Rohstoffverbrauch wächst** seit Jahren **überproportional**.
- **Neben den Bekleidungstextilien** müssen in Zukunft vor allem die **Haus- und Heimtextilien und die technischen Textilien** in die Betrachtung mitaufgenommen werden.
- Die **Zahlen** zum textilen Verbrauch und dessen Zusammensetzung sind **unzureichend** und müssen zur besseren Maßnahmenentwicklung deutlich verbessert werden.
- Die verfügbaren Verfahren für die stoffliche Verwertung zeigen **nur bei mechanischem Recycling eine industrielle Reife** bei jedoch problematischer Tendenz zum Downcycling. Alle anderen Verfahren sind noch weit von einer industriellen Skalierung entfernt mit z. T. problematischer Energie- und Umweltbilanz.
- Bisher zeigt nur das **mechanische Recycling** ein Potenzial für eine **wirtschaftliche und industriell realisierbare Anlage**
- Für den Ansatz der **Wasserstoffvergasung** wurden die Randbedingungen analysiert.
  - Mit einer für Bayern verfügbaren Menge von 70.000 t im Restabfall ist die **Menge relativ klein**, um eine Anlage wirtschaftlich und technisch sinnvoll auszulegen.
  - Der auf Basis von Sortieranalysen ermittelte Rohstoffmix zeigt jedoch durch die relativ **große Menge an Polyester und Baumwolle** ein **sinnvolles Potenzial**.
  - Eine mögliche Anlagenplanung zeigt, dass eine **Pilotanlage sinnhaft** ist, um das mögliche Potenzial durch Entwicklung weiter zu erforschen
  - Die **Wirtschaftlichkeit** einer solchen Anlage ist **noch nicht gegeben**, zeigt jedoch Entwicklungspotenzial angesichts des zu erwarteten Bedarfs und der Zukunftsfähigkeit der Wasserstoffgewinnung.
- Eine Raumanalyse in Bayern zeigt einen sinnvollen Ansatz zur Realisierung einer **Pilotanlage im Großraum München-Ingolstadt-Augsburg**.
- Die gesetzlichen Rahmenbedingungen vor allem aus der EU werden den **Handlungsdruck** zur Entwicklung neuer Strategien deutlich erhöhen.
- Die Schaffung von **Kompetenzzentren für Textilrecycling** erscheint als sehr geeigneter Weg, die Erforschung der verschiedenen Technologien zur Textilverwertung voranzutreiben und die KMU-dominierte Textil- und Bekleidungsindustrie zu unterstützen.

- Der **Großraum Augsburg** ist für die Realisierung eines solchen Kompetenzzentrums (Re-Hub) sehr geeignet.
- Es wurde ein Maßnahmenkatalog entwickelt mit folgenden Schritten:
  - **Fokussierung auf das mechanische Recycling**
  - Entwicklung verbesserter **Rücknahmesysteme** und Sammelsysteme
  - **Entwicklung automatischer Sortiersysteme**
  - Intensivierung der Forschung zur Erzeugung von Wasserstoff durch Vergasung von Alttextilien
  - Integration sinnvoller Systeme zum **chemischen Recycling**

Im Einzelnen lässt sich die Studie wie folgt zusammenfassen:

### **Bedeutung der Textilindustrie:**

Textilien lassen sich in drei wesentliche **Kategorien: Bekleidung, Haus- und Heimtextilien sowie technische Textilien**, einteilen.

Die **Textilindustrie zählt zu den wichtigsten Konsumgüterindustrien der Welt**, die eine erhebliche Menge an Rohstoffen, sowohl aus landwirtschaftlicher Produktion (Naturfasern) aber auch aus industrieller Produktion (Chemiefasern) verarbeitet und in Form von Bekleidungs-, Heim- und technischen Textilien dem Markt zur Verfügung stellt.

Die **Hauptrohstoffe** stellen **Polyester, Baumwolle und cellulosische Chemiefasern** sowie deren Mischungen, aber auch sehr **viele weitere Rohstoffe** in Form weiterer Fasern als auch Beschichtungen und Ausrüstungen dar. In Deutschland ist die Bekleidungsindustrie seit Jahren reduziert auf wenige Spezialgebiete (z. B. Sport), Handel und Mode, während der **überwiegende Teil der fertigenden Industrie** seine Schwerpunkte in **Heimtextilien, Hygiene und technischen Textilien** hat. Diese Trends gelten **auch für den Freistaat Bayern**.

**Vom Jahr 1975 bis ins Jahr 2021 vervierfachte sich die weltweite Textilfaserproduktion** von etwa 22 Mio. Tonnen auf rund 113 Mio. Tonnen Textilfasern pro Jahr. **Chemiefasern** machten 2021 mit 88,2 Mio. Tonnen etwa **78%** der Textilfaserproduktion aus. Die Woll- oder Baumwollfaserproduktion lag bei rund 25 Mio. Tonnen. Der Anteil an **Polyesterfasern** lag bei **54%** (ca. 61 Mio. Tonnen), **Baumwolle** bei **22%**, und **Polyamid und Viskose** bei **jeweils 5%**. Je nachdem welche Art Grundstoffe zum Einsatz kommen, fossil oder biosbasierte Kunststoffe, wird pro Tonne produzierten **Polyesters zwischen 51 GJ und 125 GJ** Energie verbraucht. Bei **Baumwolle** liegt der Energieverbrauch zwischen **55 GJ und 69 GJ** pro Tonne.

Im November 2022 lag der **Baumwollpreis bei 0,81 € pro kg** und **Polyestergranulat bei 0,59 €/kg**. Der Preis für Alttextilien lag 2012 noch bei 0,45 €/kg und sank auf 0,29 €/kg im Jahr 2014.

### Abfallaufkommen aus Textilien:

Im Jahr 2015 wurden rund **92 Mio. Tonnen Bekleidungstextilien weltweit zu Abfall**. Gegenüber dem Bezugsjahr 2015 wird sich Prognosen zufolge die **Menge bis 2030 um 60% erhöhen**.

In der EU werden jährlich 1,7 bis 2,1 Mio. Tonnen Alttextilien gesammelt, weitere 3,3 bis 3,7 Mio. Tonnen werden in gemischten Haushaltsabfällen entsorgt oder in den Haushalten gelagert.

In Deutschland werden über **Altkleidersammlung jährlich zwischen 1 bis 1,2 Mio. Tonnen** Altkleider und Heimtextilien getrennt gesammelt, wobei 60% wiederverwendet werden. Etwa 27% werden stofflich recycelt. Etwa **11,5%** des Sammelguts finden keine weitere Verwendung und fallen als **Restabfälle** an, die thermisch verwertet werden. Auf Grundlage verschiedener Restabfallsortieranalysen kann angenommen werden, dass in Deutschland **weitere 370.000 bis 420.000 t Textilabfälle über den Restabfall** entsorgt werden. In Deutschland werden über den **Sperrmüll 225.000 t Matratzen und 225.000 t Bodenbeläge** erfasst.

Es wird geschätzt, dass in Deutschland jährlich 450.000 t Altteppiche aus Haushalten anfallen und weiter 32.000 t/a aus Produktionsabfällen. Daraus ergibt sich eine Menge von 5,8 kg/(Ew\*a) Altteppiche, die entsorgt werden müssen. In Bayern fallen damit jährlich rund 76.000 t Altteppiche an.

### Abfallzusammensetzung:

Im Rahmen dieser Studie wurde die **Zusammensetzung der Textilien-Restabfälle** aus der Altkleidersammlung näher untersucht. Diese Abfälle sind aus **47,1% Baumwolle, 14,8% PES und aus 11,9% PES-BW-Mischgeweben** zusammengesetzt. Diese drei Fraktionen machen über 70% des Inputmaterials aus.

bifa untersuchte im Rahmen von Sortieranalysen die im Restabfall entsorgten **Textilabfälle** von **bayerischen Landkreisen und Städten**. Die Untersuchungen der letzten Jahre ergaben Textilabfallmengen im Restabfall zwischen 2,4 kg/(Ew\*a) und 11,4 kg/(Ew\*a). Der Mittelwert liegt bei **5,1 kg/(Ew\*a)**. Eine **aktuelle (2022) von bifa durchgeführte Untersuchung** eines südbayerischen Abfallzweckverbands zeigte, dass der Restabfall ca. 2,7 kg/(Ew\*a) Bekleidungstextilien und weitere 2,2 kg/(Ew\*a) sonstiger Textilien enthielt (zusammen **4,9 kg/Ew**),

was innerhalb des Bereichs liegt und die Schätzung bestätigt. Bei 13,08 Mio. Einwohner in **Bayern** kann von einer Gesamtmenge im Restabfall von 60.000 bis 70.000 t/a ausgegangen werden.

Als Summe der potenziell aus dem Restabfall abschöpfbaren Anteile und der nicht stofflich verwertbaren Anteile des Sammelguts aus der Separaterfassung von Alttextilien wird vereinfacht eine Menge von **70.000 t Textilabfälle** angenommen, die für die thermische Verwertung geeignet sind. Bei der Vergasung dieser Mengen fallen voraussichtlich ca. 1.100 t/a an zu entsorgender Asche oder Schlacke an. Im Vergleich dazu hat beispielsweise die Müllverbrennungsanlage Augsburg einen Durchsatz von 355.300 t/a und erzeugt dabei 53.800 t Schlacke pro Jahr.

### Verwertungsmöglichkeiten textiler Abfälle:

Die Verwertungsszenarien für Alttextilien sind (gemäß der Abfallhierarchie)

- **Wiederverwendung:** wird in Zukunft wachsen, kann aber in absehbarer Zeit kaum mehr als 10% erreichen
- **Mechanisches Recycling** (werkstoffliche Verwertung): etabliertes und industriell skalierbares Verfahren, dessen Hauptproblem die Fasereinkürzung ist, weshalb selbst bei Ausschöpfung des Optimierungspotenzials weitere ergänzende Verfahren notwendig sind
- **Thermo-mechanisches Recycling** (werkstoffliche Verwertung): großtechnisch bei Textilien noch nicht etabliert, nur für thermoplastische Materialien, Kettenlängen aktuell nicht ausreichend für eine Verspinnung
- **„chemisches Recycling“** (rohstoffliche Verwertung): diverse Verfahren mit großem Entwicklungspotenzial, jedoch weit von Industriereife entfernt mit schlechter Energiebilanz und z.T. problematischer Umweltbilanz

Eigene beispielhafte Wirtschaftlichkeitsanalysen verschiedener Recyclingverfahren sowie aktuelle Studien zur Wirtschaftlichkeit lassen folgende Schlüsse zu:

- Eine wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit recycelter Produkte ist durchaus möglich, was insbesondere für das mechanische Recycling gilt
- Die meisten „neueren“ Recyclingverfahren, insbesondere die der Gruppe der chemischen Verwertungsverfahren zugeordnet werden können, sind aus hauptsächlich zwei Gründen nicht oder noch nicht wirtschaftlich:

- Es muss zusätzlich Energie aufgebracht bzw. zusätzliche Verfahrensschritte implementiert werden
- Die Verfahren sind wegen des geringen Entwicklungslevels noch nicht in industriell sinnvollen Skalierungen verfügbar.

Es ist davon auszugehen, dass sich die Sammelmenge und Qualität der getrennt gesammelten Alttextilien durch die 2018 überarbeitete EU-Abfallrahmenrichtlinie [2008/98/EG] stark verändern wird. In der EU-Abfallrichtlinie fordert die EU **ab dem 1. Januar 2025 eine getrennte Erfassung von Alttextilien**. Für Länder, wie Deutschland, mit gut etablierten Sammelsystemen besteht die Herausforderung in der zusätzlichen Sammlung von nicht mehr tragbaren Alttextilien, die aktuell im Restabfall landen. Diese Änderungen werden voraussichtlich zu einer höheren Sammelmenge führen, bei einer zugleich abnehmenden Qualität. Alttextilien aus dem Restabfall weisen eine extensive Nutzung und einen hohen Verschmutzungsgrad auf. Bei einer Verlagerung dieser Textilabfälle in die bestehenden Sammelsysteme ist davon auszugehen, dass die **Menge an faktisch nur thermisch verwertbaren Alttextilien** bei der getrennten Sammlung **steigen** wird. [Fashion for Good, 2022]

#### **Wasserstoffpotenzial textiler Abfälle:**

Als Ersatz für fossile Energieträger wird grüner **Wasserstoff** in vielen Bereichen als **essenziell** zum Erreichen von Klimaschutzziele angesehen. So sieht die bayerische Wasserstoffstrategie **Wasserstoff als zentrales Schlüsselement zur Sektorkopplung**, mit dessen Hilfe erneuerbare Energien auch in Sektoren Einzug finden können, die sich nur schwer oder sich nicht elektrifizieren lassen. Deutschlandweit liegt der aktuelle Wasserstoffverbrauch bei ca. 55 TWh. Der Wasserstoff wird dabei in erster Linie für stoffliche Herstellungsverfahren in der Industrie verwendet. Dazu gehören etwa in gleichen Teilen die Grundstoffchemie, vor allem die Ammoniaksynthese und die Methanolherstellung sowie die Petrochemie. Der Großteil des verwendeten Wasserstoffs wird aus fossilen Quellen gewonnen. Für Deutschland und Bayern ist daher mit einem **stark ansteigenden Bedarf an Wasserstoff** zu rechnen. So wird der Bedarf an Wasserstoff für Bayern für das Jahr 2030 auf ca. 10 TWh/a und im Jahr 2050 auf ca. 61 TWh/a geschätzt.

Die **Erzeugung von Wasserstoff aus Abfällen und im speziellen Textilabfällen** wurde in Europa **bisher nicht großtechnisch realisiert**. Die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage ist schwer bestimmbar, zumal eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien und Verfahrensdetails sowie unterschiedliche Einsatzstoffe existieren. Angaben reichen von spezifischen Kostenangaben pro kg Wasserstoff bis hin zu detaillierten Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Im

Rahmen dieser Studie wurde eine **Abschätzung der Wirtschaftlichkeit** durchgeführt. Der berechnete Wasserstoffpreis für die Wasserstoffherzeugung mittels Vergasung von **3,0 bis 4,2 €/kg** erscheint dabei **aktuell (2022) nicht konkurrenzfähig** gegenüber konventionellen Verfahren zur Wasserstoffherzeugung aus fossilen Energieträgern mit 1,5 bis 5 €/kg Wasserstoff. Die Produktionskosten von **grünem Wasserstoff aus Elektrolyse** liegen heute zumeist bei 5 bis 8 €/kg, mit denen der hier ermittelte Wert für die **Vergasung konkurrenzfähig** wäre. Bei dem gegebenen **Faseranteil von über 70% des Probematerials** – Baumwolle- und Polyester - ist ein **hohes Wasserstoffgewinnungspotenzial** absehbar. Jährlich fallen in Bayern 70.000 t Textilabfälle an, die aktuell thermisch verwertet werden und damit für die Vergasung in Frage kommen. Mit einer Wasserstoffausbeute von ca. 80 g/kg ergibt sich damit eine Gesamtmenge an **aus Textilabfällen produzierbaren Wasserstoff von 5.600 t/a**. Bei einem Wasserstoffpreis von 2,5 €/kg Wasserstoff ergibt sich damit ein **Potenzial von ca. 14 Mio € pro Jahr**. Bezogen auf den prognostizierten Bedarf (10 TWh/a 2030 bzw. 61 TWh/a 2050) kann die Textilvergasung damit nur einen geringen Beitrag zur zukünftigen Wasserstoffherzeugung leisten. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass zu erwarten ist, dass die nächsten Jahre nicht mit einer starken Abnahme der Textilabfälle zu rechnen ist. Eine hochwertige Verwertung der nicht stofflich recyclingbaren Textilabfälle ist daher in den nächsten Jahren erforderlich.

#### **Anlagenkonzept für die Wasserstoffvergasung:**

Im Rahmen dieser Studie wurde ein **Anlagenkonzept** erstellt mit dem 70.000 t/a Textilabfälle zu 5.600 t/a Wasserstoff umgesetzt werden könnten. Es ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der Komplexität insbesondere der Gasaufbereitung eine **Anlage mit höherem Durchsatz aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoller** erscheint. Typische Anlagengrößen für Anlagen dieser Art liegen im Bereich von 250.000 und 400.000 t im Jahr. Es kann daher sinnvoll sein, Textilabfälle aus Grenzregionen außerhalb Bayerns zu importieren oder zusätzlich textilfremde Abfälle ähnlicher stofflicher Zusammensetzung einzusetzen.

#### **Machbarkeitsanalyse und detaillierteres Anlagenkonzept für die Wasserstoffvergasung:**

Prinzipiell ist die **thermochemische Umwandlung von Textilabfällen technisch machbar**. Die im Anlagenkonzept verwendeten Aggregate sind bereits oft im Einsatz. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist im Prinzip realistisch machbar, hängt jedoch von den Rahmenbedingungen ab. Einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hat der Wasserstoffpreis.

Der Energieverbrauch von Vergasungstechnologien ist aufgrund der hohen Temperaturen sehr hoch. Zusammen mit den erforderlichen Gasreinigungs- und Aufbereitungsschritten ist

die zu erwartende **Umweltbelastung** des Verfahrens **höher als bei mechanischen oder thermo-mechanischen Recyclingverfahren**. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass aktuell nicht alle Textilabfälle für ein stoffliches Recycling geeignet sind. **Vorteile der Vergasung liegen vor allem darin, dass es für heterogene und gemischte Abfälle geeignet ist**. Eine aufwändige Vorsortierung und Abtrennung von Verunreinigung sind dabei nicht notwendig. Es kann damit bestehende Recyclingverfahren ergänzen.

Für das im Rahmen dieser Studie vorgeschlagene Anlagenkonzept wurden etablierte Technologien aus der Praxis herangezogen. Die Anlage könnte **aus folgenden Hauptaggregaten** aufgebaut sein:

- Vorbehandlung (Zerkleinerung, Metallabtrennung und Brikettierung)
- Niedrigtemperaturwirbelschichtvergasung (600 bis 800 °C)
- Hochtemperaturwirbelschichtvergasung (1.300 bis 1.500 °C) mit direkt angeschlossener Quenche
- Gaswäscher zur Abtrennung von HCl, HF und Partikeln
- Wassergasshiftreaktor
- Methanol-Adsorptionsverfahren zur Abtrennung von Kohlendioxid und Verunreinigungen
- Druckwechseladsorption

### **Standortanalyse:**

Es wurde eine **Raumanalyse** zu Aufkommen von **Textilabfällen in Bayern** mittels Geoinformationssystemen durchgeführt, um einen geeigneten logistisch zentralen Standort oder mehrere dezentrale Standorte für eine Textilrecycling zu bestimmen. In diesem Zusammenhang wurden die wichtigsten Akteure im Bereich der Textilabfallherzeugung und -entsorgung in Bayern ermittelt.

Die räumliche Verteilung des Altkleideraufkommens wurde über die Bevölkerungsverteilung in Bayern ermittelt. Das bevölkerungsgewichtete Zentrum Bayerns - und damit die **Lage eines möglichen zentralen Standorts** - liegt in dieser Betrachtung **nordwestlich von Ingolstadt**. Die Lage wird durch die Ballungsräume München, Nürnberg und Augsburg sowie eine starke Bevölkerungsansammlung im Westteil Bayerns beeinflusst. Parallel zur Bevölkerungsentwicklung hat sich in den Verdichtungsräumen auch die **Infrastruktur** entwickelt, so dass eine gute Verkehrsanbindung besteht. Die Ansiedlung einer auf Bayern beschränkten zentralen Behandlungsanlage ist im Großraum Ingolstadt sinnvoll.

Die Standortverteilung der Anlagen zur Verwertung oder Beseitigung von Textilabfällen ist in Bayern annähernd deckungsgleich mit der Bevölkerungsverteilung und sind deshalb

verkehrsseitig gut angebunden. An acht Standorten werden ausschließlich Abfälle aus der Textilindustrie behandelt.

Die höchste Dichte und stärkste Ansammlung großer **Textilhersteller und -veredler** finden sich in Franken, **insbesondere im Raum Bayreuth-Hof**. Bei der Textilproduktion kann mit größeren Mengen gewerblichen Textilien Abfällen gerechnet werden. Somit weicht die Konzentration gewerblicher textiler Abfälle im Nordosten vom Altkleideraufkommen (über Bevölkerungsverteilung) räumlich ab. Weitere Verdichtungen sind in den Räumen Aschaffenburg und Würzburg-Nürnberg festzustellen. Weitere Unternehmen finden sich entlang der Achse Ulm-Regensburg sowie der Achse Kempten-Passau.

Aus den Ergebnissen der Raumanalyse lassen sich **zwei Standort-Szenarien** skizzieren:

- Eine **zentrale Verwertungsanlage** wäre fahrtstreckenbezogen **am ehesten in Nürnberg** aufzubauen, insbesondere wenn die Mengen aus dem Raum Bayreuth-Hof innerhalb Bayerns behandelt werden sollen und nicht nach Thüringen oder Sachsen verbracht werden.
- Der **Aufbau dreier lokaler zentraler Verwertungsanlagen** käme im Umfeld von München/Augsburg, Bayreuth und Würzburg in Betracht und würde den Fahraufwand deutlich reduzieren.

### **Textiles Re-Hub in Bayern:**

Angesichts der absolut **ungenügend ausgeprägten textilen Kreislaufwirtschaft** mit sehr schlechten Zahlen bezüglich der Verwertung von Sekundärtextilien ist **großer Handlungsbedarf** gegeben. Verschärft wird dieser Handlungsdruck durch die Vorgaben internationaler Aktivitäten (UN Sustainable Development Goals) vor allem durch den Green Deal der EU. Die 2022 veröffentlichte **EU strategy for sustainable and circular textiles** verdeutlicht diesen **Paradigmenwechsel** durch ein Bündel von Maßnahmen, die bis 2030 einen kompletten Umbau hin zu einer textilen Kreislaufwirtschaft fordern. Die überwiegend KMU-basierte Textilindustrie ist mit den notwendigen Maßnahmen zur Umsetzung aufgrund der Komplexität und wegen fehlenden Wissens überfordert, so dass die **Schaffung von Kompetenzzentren (RE-HUBs)** sinnvoll erscheint. Die Studie führt die notwendigen Komponenten für die Schaffung solcher Kompetenzzentren an und erläutert die **besondere Eignung der Region Augsburg** für die Realisierung eines solchen textilen Recycling-HUBs.

Vor dem Hintergrund der wachsenden Bedeutung des textilen Recyclings erscheint die **Schaffung eines textilen Kompetenzzentrums Recycling in Süddeutschland** sehr empfehlenswert, um der Textilindustrie für die Zukunft eine realistische und zukunftsichernde Ausgangsposition im internationalen Wettbewerb zu ermöglichen.

### **Fazit:**

Basierend auf der Tatsache, dass sich unterschiedliche Verwertungsszenarien und -technologien im Wesentlichen komplementär und nicht konkurrierend verhalten, ist die Konzentration auf diejenigen Verfahrensschritte besonders wichtig, die für alle Verfahren angewendet werden.

Neuen Sammel- und Sortierstrategien im Vorfeld der eigentlichen Verwertung als auch Design-4-Recycling und angepasster Produktentwicklung kommt daher hohe Wichtigkeit zu. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen ergibt sich folgende Priorität in der Umsetzung von Maßnahmen.

1. **Fokussierung auf das mechanische Recycling**, um das ökonomische Potenzial kombiniert mit der vorhandenen industriellen Skalierbarkeit und der Ausschöpfung verbesserter Qualität zeitnah umsetzen zu können.
2. Entwicklung verbesserter **Rücknahmesysteme** zur Qualitätssteigerung der Alttextil-Rohstoffe für die verschiedenen Recyclingsysteme.
3. Fortsetzung und Intensivierung der **Entwicklung automatischer Sortiersysteme** mit Hilfe neuartiger Sensorik und Methoden der KI.
4. Intensivierung der Forschung **zur Wasserstofferzeugung** aus textilen Abfällen zur Vorbereitung einer Pilotanlage als erstem Schritt der industriellen Umsetzung.
5. Integration sinnvoller Systeme zum **chemischen Recycling** als Ergänzung zu den vorhandenen Recyclingsystemen mit dem Fokus auf Mischungen und nicht mehr ver-spinnbare (weil zu kurze) Faserqualitäten.

## 2 Rahmenbedingungen und Ziele dieser Studie

### 2.1 Nationale und internationale Rahmenbedingungen

Bereits in Zeiten unzureichender Materialverfügbarkeit aufgrund von Wirtschaftskrisen, wenig Globalisierung und auch Kriegen im vorletzten Jahrhundert waren in Spinnereien Produktionsabfälle wertvolles Fasergut, das durch mechanisches Aufbereiten wieder zurück in den Spinnprozess geführt wurde. Ebenso sind Reste aus der textilen Flächenherstellung als wertvoller Rohstoff zur Rückgewinnung erkannt worden. Der Unterschied zu damals ist heute die Vielfalt der textilen Materialmischungen und die Qualität des Ausgangsmaterials, was das Recycling nicht nur von Pre-Consumer oder Fertigungsabfällen, sondern vor allem auch Post-Consumer, bereits im Handel gewesenen oder gebrauchten Textilien, erschwert. Damals lagen die Materialien in Reinform mit adäquaten Faserlängen vor. Synthetische Fasern waren selten, bzw. gab es noch nicht. Die Nutzungsphasen von Textilien unterlagen weniger den Schwankungen der Mode, das Bevölkerungswachstum war überschaubar und damit auch der anfallende textile Abfall.

Global lassen heute Bevölkerungswachstum, Modeschwankungen und erhöhter Konsum die textilen Abfallmengen rasant wachsen. Dieser Müllberg beherbergt allerdings wertvolles Fasergut, das durch geeignete Verfahren als Sekundärrohstoff zurück in den textilen Kreislauf geführt werden kann. Der Druck zur Entwicklung von Recyclingkonzepten und den daraus resultierenden Optimierungen der einzelnen vorhandenen textilen Prozessschritte wächst.

Die internationalen Regelwerke und Vorschriften weisen der Nachhaltigkeit eine deutlich zunehmende Bedeutung zu. Ein gewichtiges Dokument in diesem Zusammenhang ist die 2015 von allen UN-Mitgliedern beschlossene Agenda for Sustainable Development [UN\_SDG], die die Umsetzung der 17 „Sustainable Development Goals (SDGs)“ fordert (Abbildung 2-1). Bis 2030 soll somit eine merkbare Verbesserung der Maßnahmen zur Erzielung einer höheren Nachhaltigkeit durchgesetzt werden, um die Klimaziele im Interesse des Erhalts der Umwelt erreichen zu können. Sehr viele nationale Regelwerke - aber inzwischen auch die Strategie und Handlungsempfehlungen einer zunehmenden Zahl von Unternehmen - orientieren sich an diesen Regeln.



Abbildung 2-1: Nachhaltigkeitsziele [UN\_SDG]

Eine wachsende Bedeutung gewinnt auch die Environmental Social Governance. Dabei handelt es sich um einen 2006 entwickelten Standard, bei dem sich Unternehmen im Zuge der Initiative Principles of Responsible Investments (PRI) freiwillig dazu verpflichten, die verschiedenen ESG-Kriterien einzuhalten. Über 3.000 Unternehmen weltweit haben sich mit dem Unterzeichnen der PRI-Initiative dazu verpflichtet, die für Environmental Social Governance relevanten Punkte in ihre Unternehmenspolitik zu integrieren (ESG) [PRI\_ESG].

Von besonderer Bedeutung sind jedoch vor allem die vor diesem Hintergrund entstandenen Maßnahmenpakete, die sich im Geltungsgebiet der EU auf Basis des sog. Green Deals [EU GreenDeal] entwickelt haben (Abbildung 2-2).

Im April 2022 veröffentlichte die EU-Kommission die aus dem Green Deal abgeleitete EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles [EUStrat2022]. Bis 2030 sollen damit verbindliche Maßnahmen für langlebige und recyclebare textile Produkte, die frei von gefährlichen Inhaltsstoffen sind und in der Produktion den Respekt der sozialen wie auch der Umweltaspekte berücksichtigen, entstehen.

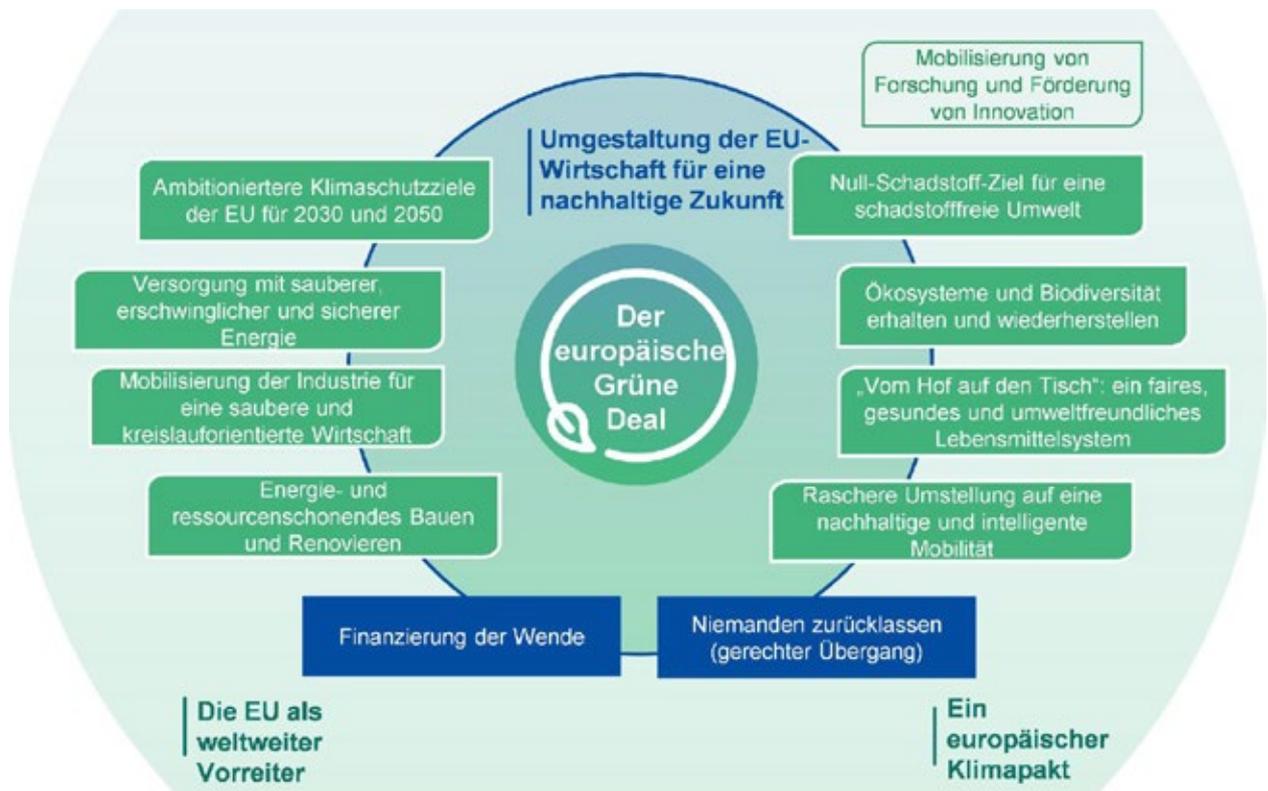


Abbildung 2-2: Der Europäische Grüne Deal [EU GreenDeal]

Basis ist die Abfallhierarchie mit einer klaren Einhaltung der Reihenfolge der Verwertungsprinzipien, wie sie auch im deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz festgeschrieben ist. Diese Hierarchie dient dazu, diejenigen Optionen zur Abfallbewirtschaftung besonders zu fördern, die insgesamt das beste Ergebnis unter dem Aspekt des Umweltschutzes erbringen. Dabei ist der gesamte Lebenszyklus des Abfalls zugrunde zu legen.

Die Rangfolge der Prioritäten ergibt sich damit folgendermaßen:

1. Oberste Priorität hat die Vermeidung von Abfällen, etwa durch die Wiederverwendung von Stoffen oder Gegenständen. Dies ist z. B. bei Einkaufstaschen, Kleidung oder Behältern gut möglich.
2. Auf der zweiten Stufe der umgedrehten Pyramide steht die Vorbereitung von Abfällen zur Wiederverwendung, z. B. durch Reinigung oder Reparatur. Hierzu zählt auch die Aufbereitung von Altölen.
3. Erst wenn diese beiden Möglichkeiten ausgeschöpft sind, sollen Abfälle dem Recycling zugeführt werden.
4. An vierter Stelle folgt die weitere Verwertung von Abfällen. Hier ist z. B. vor allem die energetische Verwertung und (obertägige oder untertägige) Verfüllung umzusetzen.
5. Erst als letzte Option sollen Abfälle komplett beseitigt werden



Abbildung 2-3: Abfallhierarchie [bonnorange 2022]

Aus dem sehr detailliert beschriebenen Katalog ist insbesondere die verbindliche Umsetzung folgender Maßnahmen bis 2030 vorgesehen:

- Schaffung **resilienter Prozesse**, d. h., dass industriell umsetzbare stabile und erprobte Verwertungskonzepte entstehen sollen.
- Es sollen europaweit genügend Kapazitäten für **flächendeckendes Faser-zu-Faser Recycling** geschaffen werden
- Die bestehende **Eco-Design-Richtlinie** soll bis 2023 neugefasst und in nationales Recht umgesetzt werden. Sie sieht u.a. vor:
  - Eine Erhöhung des Gebrauchswerts von Textilien
  - Eine erhöhte Haltbarkeit aller Komponenten
  - Eine Verbesserung der Sortierung und des Recyclings
  - Dass die Richtlinie die Basis für alle öffentlichen Beschaffungen werden soll
- **Design 4 Recycling** wird zum zentralen Element in der Produktgestaltung
- **Überproduktion** wird anzeigepflichtig und soll **vermieden** werden
- Ein **digitaler Produkt-Ausweis** soll das Sortieren und Erkennen Textilien erleichtern
- Die **erweiterte Produkthaftung** soll europaweit den Hersteller auch für den Abfall seines Produktes verantwortlich machen. Dies Prinzip ist schon in mehreren Ländern in

der EU (z. B. Frankreich) in die Gesetzgebung eingeflossen und erhöht den Druck, auch in Deutschland ähnliche Regelungen zu schaffen.

- Der Export textiler Abfälle soll gänzlich unterbunden werden

In der Umsetzung dieser Gesetzgebung ist Deutschland inzwischen sehr stark ins Hintertreffen geraten und hat auch nach Aussagen aus den zuständigen Ministerien erheblichen Nachholbedarf in der Umsetzung. Sowohl das BMU als auch das BMWK arbeiten inzwischen an Umsetzungsempfehlungen, um den Vorgaben der EU nachzukommen.

Das geltende Kreislaufwirtschaftsgesetz schreibt ab 2025 bereits die getrennte Erfassung der textilen Abfälle nach Kategorien vor. Ein Entwurf der neuen Eco-Design-Richtlinie liegt bereits dem Bundesrat zur Beratung vor und die weiteren Richtlinienentwürfe aus der EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles werden in den nächsten zwei Jahren erwartet.

Vor diesem Hintergrund ist eine sinnvolle und kurzfristig umzusetzende Strategie unbedingt erforderlich.

Entscheidendes Merkmal der neuen EU-Strategie ist die Abstimmung der Maßnahmen über die gesamte Wertschöpfungskette. Nur wenn alle Schritte der neuen Wertschöpfung aufeinander abgestimmt sind und das Ziel haben, in geeignetem Maße zu einem neuen Gleichgewicht ökonomischer, ökologischer und technischer Zielerfüllung beizutragen, kann das Ziel einer nachhaltigen neuen Kreislaufwirtschaft Wirklichkeit werden. Neben dem eigentlichen Kernprozess der Wiederverwendung und Wiederverwertung verdienen gerade die ersten Prozessschritte des Sammelns und Sortierens als auch die finalen Schritte der Produktgestaltung im Sinne eines Design-for-Recycling besonderer Beachtung.

Diese Studie liefert einen Beitrag zur Bewertung des Status quo in Bayern und liefert Entscheidungsgrundlagen für die zukunftsfähige Weiterentwicklung der Bewirtschaftung textiler Abfälle in Bayern, die neben der technischen Neugestaltung der Wiederverwertungsprozesse auch die ökonomische und ökologische Beurteilung verstärkt in den Fokus nimmt

## 2.2 Ziele und Aufbau dieser Studie

Die Textilindustrie bildet den drittgrößten Industriesektor weltweit und den zweitgrößten Konsumgütersektor in Deutschland. Die Non-Profit-Organisation Textile Exchange prognostizierte für das Jahr 2025 eine Faserproduktion von 132 Mio. Tonnen weltweit und ermittelte, dass aktuell weltweit weniger als ein Prozent der Textilabfälle stofflich recycelt werden. Bis zum Jahr 2025 müssen Mitgliedsstaaten der EU gemäß Abfallrahmenrichtlinie die getrennte Sammlung von Alttextilien einführen und Zielvorgaben für die Vorbereitung zur

Wiederverwendung und das Recycling festlegen. Insbesondere Natur- und Kunstfasermischungen stellen für die stoffliche Verwertung eine Herausforderung dar.

Das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, der Verband der Bayerischen Textil- und Bekleidungsindustrie e. V. und der vbw - Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V. förderten das Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH und die bifa Umweltinstitut GmbH mit der Durchführung dieser Studie.

Angestrebt wird mit dieser Studie das ökonomische Potenzial des Textilrecyclings und der Wasserstofferzeugung aus Textilabfällen in Bayern zu bestimmen.

In **Abschnitt 3** werden die **Produktionsprozesse der textilen Wertschöpfungskette** und die am meisten eingesetzten Materialien beschrieben. Zusätzlich wird die bayerische Textilindustrie skizziert. Darüber hinaus wird die Verfahrenstechnik im Herstellungsprozess dargestellt sowie der Energieaufwand und die Produktionskosten pro Tonne Primärtextil recherchiert.

In **Abschnitt 4** stehen die Textilabfälle im Vordergrund. Im ersten Schritt werden die aktuellen Daten zu **Textilabfallmengen** recherchiert. Auf diese Weise kann das stoffliche Potential ermittelt und damit das theoretisch erzeugbare Wasserstoffpotential berechnet werden. Die Betrachtung erfolgt dabei auf den Ebenen Welt, Deutschland und Bayern.

Zur Erhebung weiterer Mengendaten und zur Ermittlung der Textilabfallzusammensetzung wurde eine **Textilabfallsortieranalyse** durchgeführt, die in **Abschnitt 5** dargestellt wird. Das Untersuchungsgebiet war hierbei die Stadt Augsburg als repräsentative bayerische Stadt. Zunächst wurde hierfür das Untersuchungsgebiet strukturell analysiert und die Probenahme an den Sammelstellen durchgeführt. Die Sortierung erfolgte anschließend anhand eines vorher festgelegten Sortierkatalogs. Die Ergebnisse aus der Sortieranalyse wurden statistisch ausgewertet. Aus den Textilabfällen wurde eine Probe genommen, um eine Brennstoffanalyse durchzuführen, die für die Bewertung der Eignung von Textilabfällen für die Wasserstofferzeugung mittels Vergasung erforderlich ist.

Um die wirtschaftliche Machbarkeit und Konkurrenzfähigkeit neuer technologischer Ansätze des Textilrecyclings zu bestimmen, wird in **Abschnitt 6** der **Status quo des Textilrecyclings** ausführlich beschrieben. Zunächst werden Werkstoffliche Recyclingverfahren (mechanisches Recycling, Lösemittelbasierte Trennung und Thermomechanisches Recycling) betrachtet dann Rohstoffliche Recyclingverfahren (Chemisches Recycling, Thermochemisches Recycling und Thermische Verwertung). Die einzelnen Verfahren werden anschließend beurteilt, indem die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT-Analyse) aus heutiger Sicht aufgelistet werden. Darüber hinaus erfolgt die Betrachtung des Forschungsstands zu

Recyclingverfahren. Abschließend wird eine **ökonomische Potenzialanalyse** durchgeführt, um die Ansätze für die Umsetzung unter wirtschaftlichen Aspekten einzuschätzen.

In **Abschnitt 7** wird eine Prognose zum **Wasserstoffbedarf in Bayern** recherchiert und bewertet. Es werden die heutigen und zukünftigen Wasserstoffbedarfe und die jeweiligen Einsatzbereiche beschrieben und die Produktionskosten kalkuliert. Außerdem wird das Wasserstoffpotential der in Bayern anfallenden Textilabfälle berechnet und bewertet.

In **Abschnitt 8** werden **Vergasungsverfahren für Abfälle** beschrieben, die auch für Textilabfälle nach einer entsprechenden Vorbehandlung geeignet sein können. Neben der Verfahrenstechnik werden die Investitionskosten der Anlagenaggregate und die Betriebskosten recherchiert oder berechnet. Die Ergebnisse aus der Untersuchung dienen der Bestimmung der geeigneten Anlagenaggregate für den Einsatz von Textilabfällen und der Konzeption einer Anlage.

In **Abschnitt 9** wird ein Vorschlag für ein **Anlagenkonzept** ausgeführt, das sich von der Vorbehandlung bis über die Wasserstoffreinigung erstreckt. Abgeschlossen wird der Abschnitt mit einer Bewertung zur technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit des Konzepts für den Wirtschaftsstandort Bayern.

In **Abschnitt 10** erfolgt eine **Raumanalyse zu Aufkommen von Textilabfällen in Bayern**, mit der Textilsammlung und Logistik analysiert werden. Hierfür werden das Textilabfallaufkommen aus Siedlungsabfällen, die Standorte der Textilhersteller und der Entsorgungsbetriebe in Bayern mittels Geoinformationssysteme analysiert und bewertet. In diesem Zusammenhang werden die wichtigsten Akteure im Bereich der Textilabfallherzeugung und -entsorgung in Bayern ermittelt. Daraus wird ein Vorschlag für einen möglichen logistisch zentralen Standort oder mehrere dezentrale Standorte für eine Textilrecycling ermittelt.

Im **Abschnitt 11** wird aufgezeigt, inwiefern **Umsetzungsmöglichkeiten im Rahmen eines bayerischen Textilrecycling-Hubs** in Form eines Kompetenzzentrums am Standort Augsburg möglich und sinnvoll sind und das Momentum und die Fördermöglichkeiten durch die EU nutzen können. Die besondere logistische Lage des Wirtschaftsraums Augsburg verbunden mit der am Standort vorhandenen textilen Kompetenz in Forschung und Industrie sowie der generell vorhandenen Materialkompetenz könnten die Basis für eine Modellregion in Sachen textiler Verwertungs- und Recyclingstrategien bilden.

## 3 Textile Rohstoffe und Wertschöpfungskette

### 3.1 Textile Rohstoffe

Die Textil- und Bekleidungsindustrie zählt zu einer der ältesten Industrien. Die textilen Herstellungsprozesse, wie zum Beispiel das Weben, wurden bereits 1785 mit der Erfindung des „Kraftstuhls“ von Edmund Cartwright mechanisiert, um schon damals die Produktivität zu steigern und den Bedarf an textilen Erzeugnissen zu decken (Abbildung 3-1).

Grundsätzlich wird im folgenden Text die Textilindustrie sachlich von der nachgelagerten Bekleidungsindustrie unterschieden. In beiden Fällen wird jedoch von textilen Erzeugnissen gesprochen, die nicht nur in Bekleidung, sondern mittlerweile variantenreich in vielen Branchen ihren Einsatz finden.



Abbildung 3-1: Halbmechanischer Handwebstuhl mit Schützen, ca. 1948  
[Bildquelle: Bettina Cherdron]

Als Textil werden Stoffe bezeichnet, die aus spinnbaren Fasern mittels textiler Techniken zu linien-, flächenförmigen oder dreidimensionalen Objekten verarbeitet werden. Dies erfolgt in einer Vielzahl von Prozessen mit sehr ausdifferenzierten Stufen der Wertschöpfungskette. Nach EU-Verordnung Nr. 1007/2011 (Verordnung über die Bezeichnungen von Textilfasern und die damit zusammenhängende Etikettierung und Kennzeichnung der Faserzusammensetzung von Textilerzeugnissen) sind Textilien Erzeugnisse mit einem Gewichtsanteil an Textilfasern von mindestens 80%. So können Textilien aus mehrschichtigen Materialverbunden bestehen und weiterhin als Textil gelten, wenn der textile Charakter bestimmend ist [DIN 1969]. Textilien lassen sich in drei wesentliche Kategorien einteilen: **Bekleidung, Haus- und Heimtextilien** sowie **technische Textilien**.

Als Rohstoff zur Fasergewinnung kommen neben Naturfasern heutzutage überwiegend synthetische Fasern zum Einsatz. Naturfasern können sowohl pflanzlichen (Baumwolle oder Leinen), als auch tierischen (Schafwolle und Kaschmir) Ursprungs sein. Sie unterliegen somit landwirtschaftlichen Einflüssen und Begebenheiten. Neben den pflanzlichen und tierischen Naturfasern gibt es noch Mineralfasern. Diese sind für Bekleidungstextilien nicht relevant und werden daher nur der Vollständigkeit halber genannt. Die Fasern können entsprechend nachfolgender Tabelle 3-1 eingeteilt werden.

Tabelle 3-1: Einteilung Fasern nach DIN 60 001, ISO 2076 und ISO 6938

Naturfasern			Chemiefasern		
Gruppe	Name	Kurzzeichen	Gruppe	Name	Kurzzeichen
<b>Pflanzliche Fasern</b>			<b>Chemiefasern aus natürlichen Polymeren</b>		
Samenfasern	Baumwolle	CO	Cellulosische Chemiefasern	Viskose	CV
	Kapok	KP		Modal	CMD
Bastfasern	Leinen (Flachs)	LI		Lyocell	CLY
	Hanf	HA		Cupro	CUP
	Jute	JU		Acetat	CA
	Ramie	RA		Triacetat	CTA
Hartfasern	Sisal	SI	Alginat	Alginat	ALG
	Manila (Abacá)	AB	Gummi	Gummi	LA
	Kokos	CC	Regenerierte Proteinfaser	Milch(fasern)	-
<b>Tierische Fasern (Eiweiß)</b>			<b>Chemiefasern aus synthetischen Polymeren</b>		
Wolle	Wolle	WO	Elasto	Elastan, Spandex	EL, SP
	Schurwolle	WV		Elastoien	ED
Feine Tierhaare	Alpaka	WP	Fluoro	Fluorfaser	PTFE
	Lama	WL	Polyacryl	Polyacryl	PAN
	Vikunja	WG		Modacryl	MAC
	Guanako	WU	Polyamid	Polyamid	PAN
	Kamel	WK		Aramid	AR
	Angora	WA	Polychlorid	Poly(vinyl)chlorid	CLF
	Mohair	WM		Polyvinylidenchlorid	CLF
	Kaschmir	WS	Polyester	Polyester	PES
	Kaschgora	WSA		Polyolefin	Polyethylen
	Yak	WY	Polypropylen		PP
	Grobe Tierhaare	Tinderhaar	HR	Polyvinylalkohol	Polyvinylalkohol
Rosshaar		HS	<b>Chemiefasern aus anorganischen Stoffen</b>		
Ziegenhaar		HZ	Glas	Glas	GF
Seiden	Seide (Maulbeerseide)	SE	Kohlenstoff	Kohlenstoff	CF
	Tussahseide	ST	Metall	Metall	MTF
<b>Mineralische Fasern</b>					
Gesteinsfasern	Asbest	AS			

Sonnenenergie ist die Grundlage aller Fasern, unabhängig deren natürlichen oder künstlichen Ursprungs. Die Substanz der Pflanzenfasern, wie Baumwolle oder Leinen, besteht aus Cellulose, die durch den physiologischen Prozess der Photosynthese entsteht (Abbildung 3-2). Chemiefasern oder auch sogenannte „Man Made Fibers“ (MMF) können sowohl aus natürlichen als auch synthetischen Polymeren gewonnen werden. Somit erfolgt eine Differenzierung der Chemiefasern entsprechend dieser beiden Gruppen.

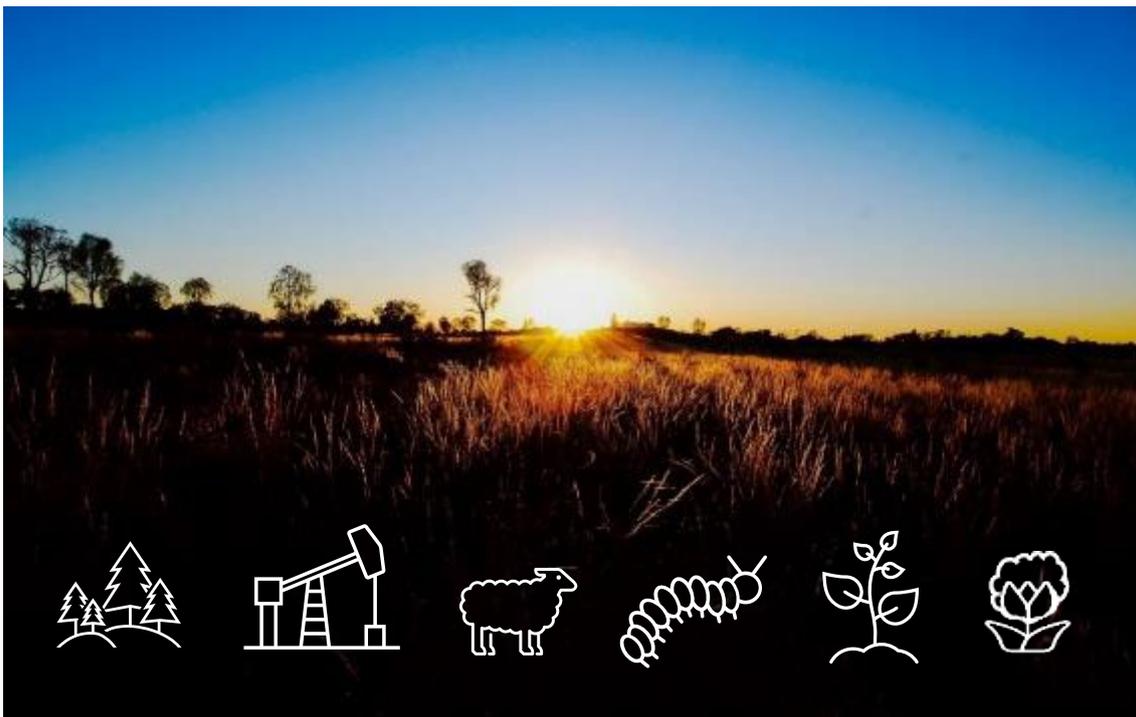


Abbildung 3-2: Übersicht Ursprung Faserarten [Bildquelle: Bettina Cherdron]

Wirtschaftliche Bedeutung innerhalb der Gruppe synthetischer Fasern aus natürlichen Polymeren erlangen nur die cellulosischen Fasern wie Viskose-, Modal- oder Lyocellfasern (Abbildung 3-3). Prozesse und Produkte aus Kautschuk oder Alginatfasern sind Nischenprodukte mit untergeordneter wirtschaftlicher Bedeutung. Je nach Herstellungsverfahren und Ausgangsstoff entstehen Fasern mit unterschiedlichen bekleidungsphysiologischen (u. a. Feuchtigkeitsaufnahme, Hautfreundlichkeit, Wärmeisolation), als auch mechanischen (u. a. Festigkeit, Dehnung) Eigenschaften.

Bei den cellulosischen Chemiefasern wird der natürliche Pflanzenstoff aufgelöst und in verschiedenen Verfahren durch Spinnndüsen zu Fasern gepresst. Grundsätzlich gibt es vier Verfahren (Viskoseverfahren, Kupferoxid-Ammoniak-Verfahren, Acetatverfahren und Lösemittelverfahren) mit denen cellulosische Chemiefasern gewonnen werden können.

Baumwolle wird an der Börse gehandelt und lag im November 2022 bei 0,81 € pro kg. Der Preis pro kg Polyestergranulat lag zu dieser Zeit durchschnittlich bei 0,59 €. [PlasTi, 2022 und Baumwollpreise, 2022]

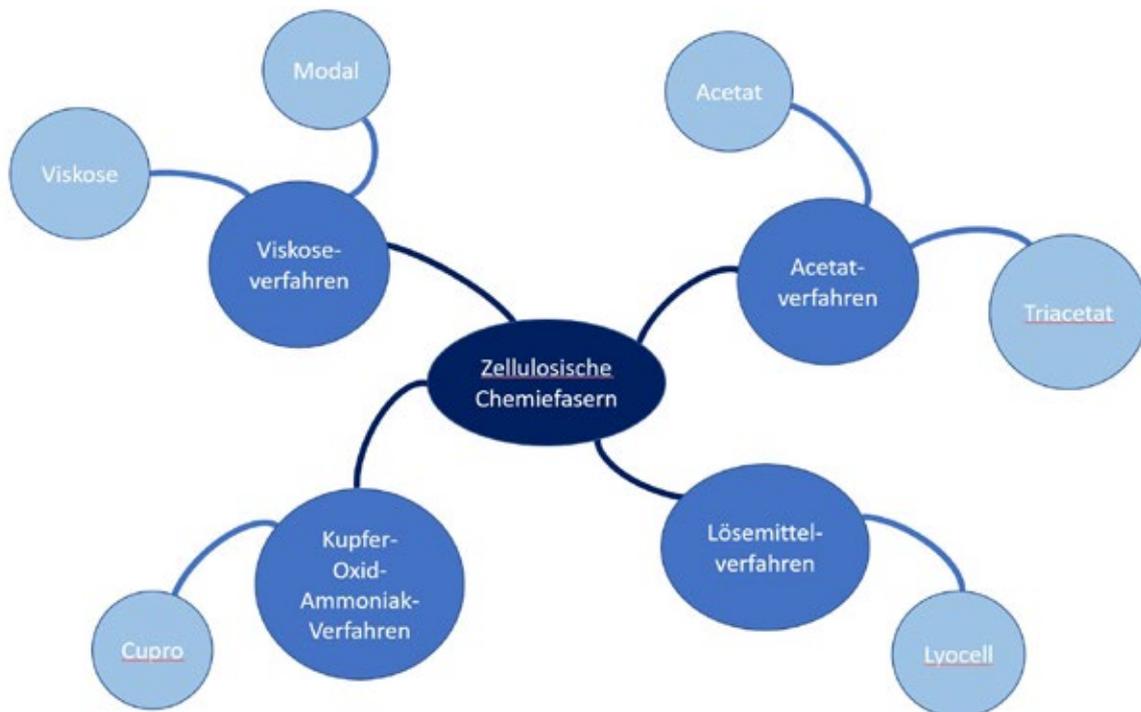


Abbildung 3-3: Einteilung zellulosischer Chemiefasern

Bei den zellulosischen Fasern sind die Viskose- und Lyocellfasern am bekanntesten. Bei dem Verfahren zur Produktion von Lyocellfasern handelt es sich im Wesentlichen um eine Neuentwicklung zur Herstellung von Viskosefasern. Als Lösemittel wird hier Aminoxid verwendet. Produkte aus Rohöl sind die Grundlage synthetischer, also künstlich gebildeter, Polymere. Diese werden in drei verschiedenen chemischen Reaktionen, der Polymerisation, der Polykondensation und der Polyaddition aus Monomeren gebildet. In weiteren Prozessschritten und Spinnverfahren werden dann die Kunststoffe zu Fasern versponnen. Die zellulosischen Chemiefasern werden als Chemiefasern erster Generation bezeichnet. Synthetischen Fasern werden, aufgrund ihrer Entstehungsgeschichte, auch Chemiefasern zweiter Generation genannt. Mittlerweile gibt es mit den vorwiegend in technischen Textilien eingesetzten Kohlenstoff-, Glas- und Aramidfasern, Chemiefasern der dritten Generation (Abbildung 3-4).

Unter den synthetischen Chemiefasern ist Polyester am weitesten verbreitet. Für textile Fasern und in der Bekleidungstechnik wird organische Terephthalsäure mit Ethylenglykol zu Diglykolterephthalat verbunden. Das Polyethylenterephthalat (PET) wird zu Polyesterfasern (PES)

versponnen. Sie zählen zu den Polykondensatfasern und werden mittels Schmelzspinnverfahren zunächst zu Endlosfasern verstreckt. Dabei werden die Ausgangsstoffe aufgeschmolzen, durch eine Spinnöse gedrückt und durch die nachfolgende Abkühlung verfestigt. Spezielle Eigenschaften, wie. z. B. Temperaturbeständigkeit, Pillarmut, Antistatik, etc. können durch Funktionalisierung dem Polyester zugefügt werden. Somit werden Spezialtypen mit bestimmten Merkmalen der textilen Fasern erzeugt.

Die Eigenschaften von Polyesterfasern sind vielfältig und finden in verschiedenen Bereichen ihren Einsatz. Neben Sport- und Funktionsbekleidung werden auch Segel aus hochfesten Polyesterfilamenten hergestellt.

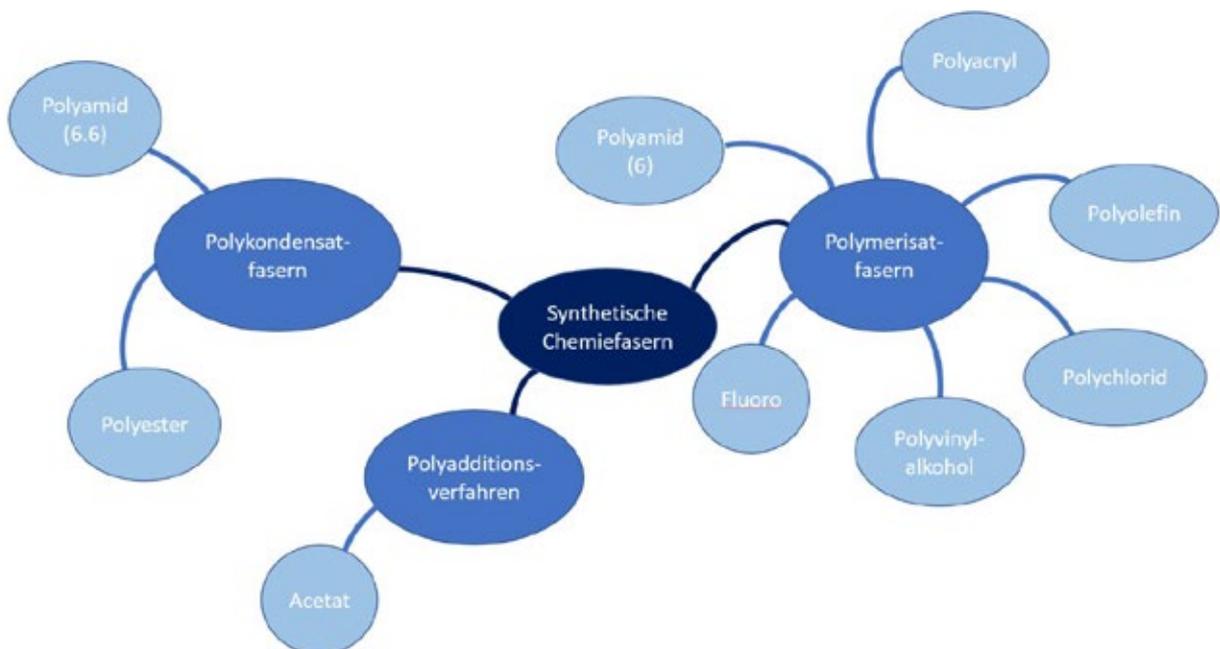


Abbildung 3-4: Einteilung synthetische Chemiefasern

## 3.2 Produktionsmengen textiler Fasern

### 3.2.1 Produktionsmengen Textilien

Baumwolle besitzt sehr angenehme bekleidungsphysiologische Eigenschaften. Sie ist weich im Griff und hautfreundlich. Daher ist sie die wichtigste Naturfaser in der Bekleidungsindustrie. Neben einem hohen Wasserverbrauch im Anbau ist die Pflanze auch für Schädlinge und Krankheiten anfällig. Demzufolge ist ihr konventioneller Anbau, mit dem drastischen Einsatz von Pestiziden und dem durch die künstliche Bewässerung hohen Verbrauch an Süßwasser, in den letzten Jahren vermehrt in Kritik geraten. Zunehmend sind daher Aktionen und Planungen den Anbau und die Ernte dieses Rohstoffes ökologischer und nachhaltiger zu gestalten. [Textilbündnis, 2022]

Die Verteilung der Produktion nach Faserart spiegelt sich auch in der Zusammensetzung von Bekleidungstextilien wider. Eine Sortieranalyse von Altkleidersammlungen im Stadtgebiet Augsburg, auf die in nachfolgenden Abschnitten näher eingegangen wird, zeigte eine Materialzusammensetzung der Textilien entsprechend der weltweiten Faserproduktion, allerdings mit einem höheren Anteil an Baumwolle. Polyester findet seinen Einsatz nicht nur in Bekleidungstextilien, sondern auch in technischen Anwendungen, weswegen der Anteil an Baumwolle bei Bekleidungstextilien im Vergleich zur weltweiten Faserindustrie signifikant erhöht ist. Kleidung ist eines der physiologischen Bedürfnisse nach Maslow [Julian B. Rotter, 1979] und zählt somit zur Basis der fünf Grundbedürfnisse. Ohne Befriedigung dieser Stufe sind alle anderen Ebenen der Bedürfnispyramide, wie z. B. Sicherheits- oder Sozialaspekte, nachrangig. Mit einem wachsenden Wohlstand in den Industrieländern ist Bekleidung aber nicht nur das Stillen eines Grundbedürfnisses, sondern dessen Konsum auch Statussymbol. Daher ist der Bedarf an Textilien stark gestiegen. Neben den **Bekleidungstextilien** gibt es mit den **Haus- und Heimtextilien** noch die Einteilung in **Technische Textilien**.

Zur **Bekleidung** zählen alle Textilien, die den Körper bedecken, bzw. verhüllen: Oberbekleidung (auch Pelze), Leibwäsche (auch Mehrwegwindeln) und Schuhe (Fußbekleidung; keine Ski- oder Schlittschuhe etc.) sowie Accessoires (mit Ausnahme von Schmuck) wie Gürtel, Handschuhe, Handtaschen (als Ersatz für fehlende Taschen in den Kleidern), Hüte, Mützen, Schals, (Pelz-)Stolen, Tücher etc.; all das ist zu Recht Teil des Sammelguts von Altkleidersammlungen [BayLfU, 2017].

Viele Bekleidungstextilien sind Mischwaren, aus verschiedenen Lagen, entsprechend ihrer Funktion zusammengefügt.

**Haus- und Heimtextilien** werden entsprechend der Bezeichnung im Haus eingesetzt. Hierunter fallen Textilien, die für die Innenausstattung und Innendekoration verwendet werden, wie

z. B. Bettwaren (Daunendecken, Steppdecken, Kopfkissen etc.), sonstige Decken, Dekorstoffe (Kissen etc.), Gardinen mit Vorhängen und Stores, Möbel- und Matratzenstoffe, Planen, Fahrentücher, Stofftaschen, Rucksäcke, Schirmstoffe, Teppiche (keine Teppichböden), Zelte etc.. [BayLfU, 2017]

Alle weiteren Textilien, die nicht zu den beiden Gruppen der Bekleidungs- und Heimtextilien gezählt werden können, werden den **technischen Textilien** zugeordnet. Dabei handelt es sich um einen Sammelbegriff für Textilfasern, Stoffe und daraus gefertigte textile Erzeugnisse, für die eher technische als ästhetische Kriterien gelten. Sie werden vor allem in den Medizin- und Hygiene-, Fahrzeug- und Baubereichen eingesetzt. Beispiele hierfür sind Verstärkungstextilien für Faserverbunde, medizinische Faserstoffe und Geotextilien. [BayLfU, 2017]

Jede dieser Gruppen besteht aus einer Vielzahl verschiedenster Faserstoffe mit unterschiedlichsten Zusammensetzungen und Ausrüstungen (z. B. Beschichtungen, Farben, Imprägnierungen, etc.).

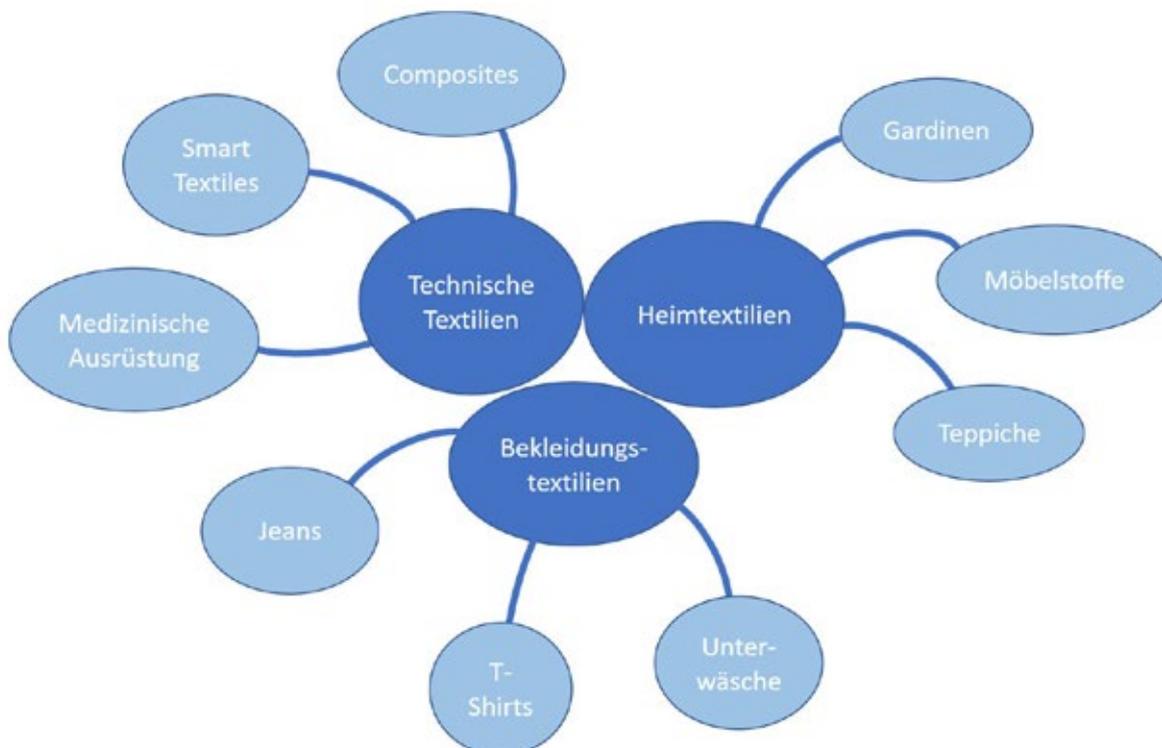


Abbildung 3-5: Einteilung Textilien mit Beispielen

Nachfolgende Abbildung 3-6 zeigt die europäischen Produktionsmengen von Textilien, eingeteilt in die jeweilige Produktparte, mit ihrem prozentualen Anteil an der Gesamtmenge. Wird

die Arbeitskleidung und Unterwäsche zu den Bekleidungstextilien gezählt, machen diese mit 37% den größten Anteil aus. [Euratex 2022]

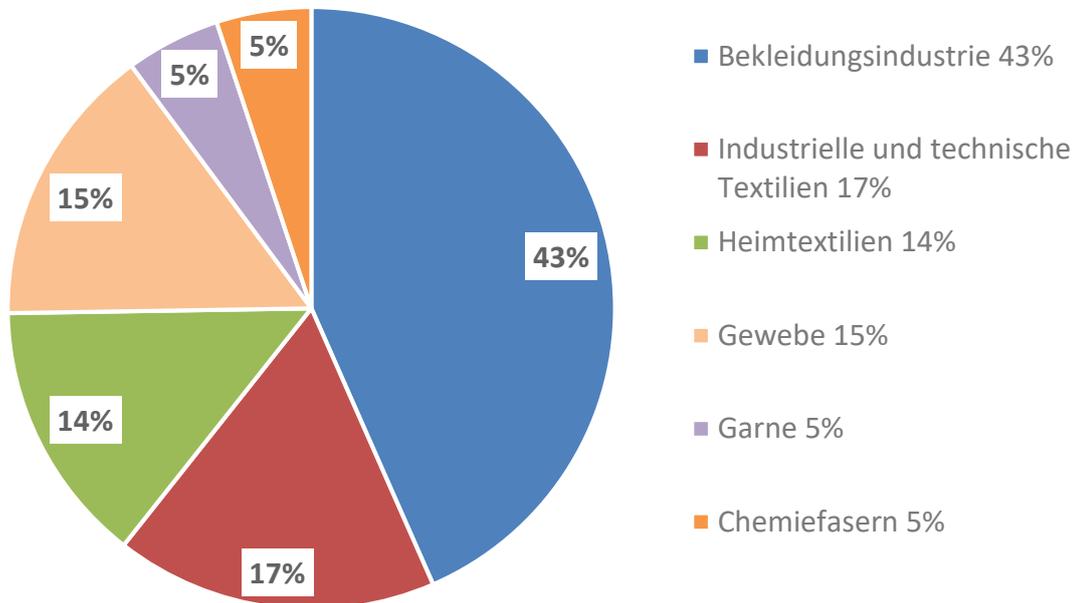


Abbildung 3-6: Übersicht Anteile Produktionsmenge von Textilien in der EU [Euratex 2022]

### 3.2.2 Produktionsmengen Textil- und Chemiefasern

Abbildung 3-7 zeigt die Entwicklung der Produktionsmengen von Textil- und Chemiefasern weltweit von 1975 bis 2021. Im Jahr 1975 lag die weltweite Textilfaserproduktion bei etwa 22 Mio. Tonnen. Diese stieg bis ins Jahr 2021 auf etwa 88,2 Millionen Tonnen Chemiefasern und etwa 25 Mio. Tonnen Woll- oder Baumwollfasern. Damit wurden 2021 insgesamt rund 113 Mio. Tonnen Textilfasern produziert. Während der Finanzkrise 2008/2009 kam es kurzzeitig zu einem Einbruch der Produktionsmengen, die aber bereits 2009/2010 wieder anstiegen. Die Chemiefasern haben dabei den größten Anteil [Textile Exchange 2022].

Die Verteilung weiterer Faserarten an der Gesamtmenge ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Der Anteil an Polyesterfasern war mit 54% (ca. 61 Mio. Tonnen), mehr als die Hälfte, gefolgt von Baumwolle mit 22%, Polyamid und Viskose mit jeweils 5%. Alle weiteren Fasern spielen somit eine untergeordnete Rolle, sind allerdings als Mischungen in Textilien und Bekleidung vorhanden.

In Abbildung 3-9 und Abbildung 3-10 werden die beiden Hauptgruppen der Faserarten aus Abbildung 3-8 auf die fasertypen Natur- und Chemiefasern zerlegt. Für diese beiden Hauptgruppen werden die Anteile der Untergruppen (Materialarten) im Detail dargestellt.

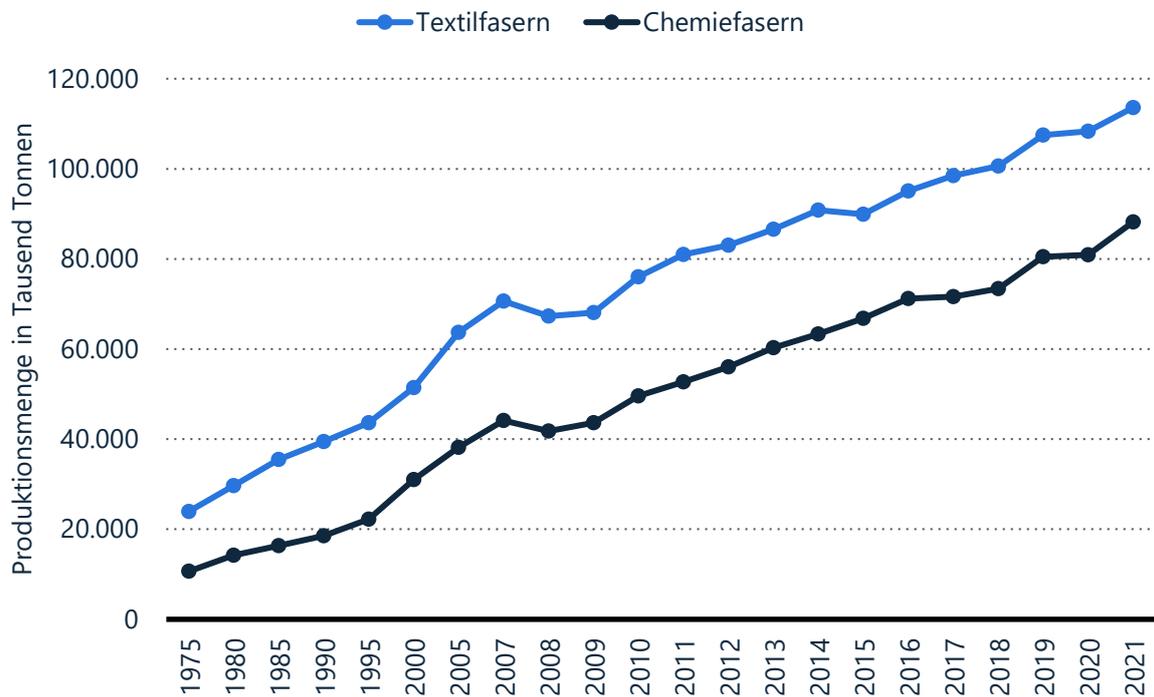


Abbildung 3-7: Produktionsmenge Textilfasern weltweit [Statista Produktionsmengen, 2022]

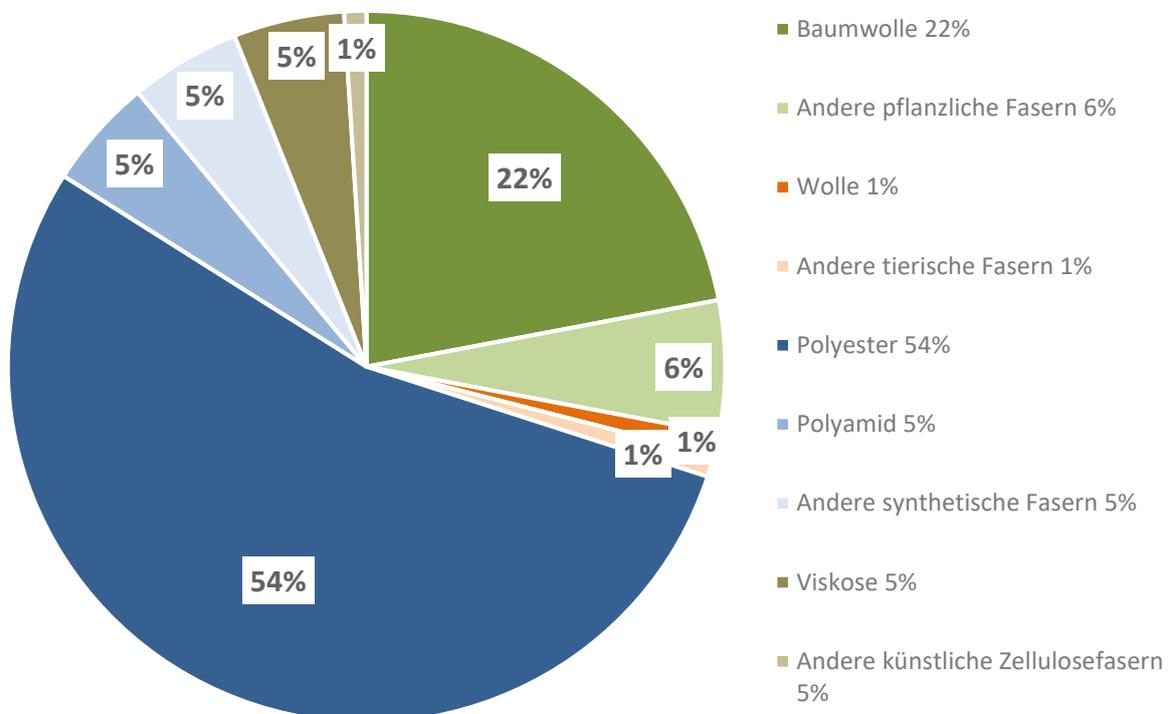


Abbildung 3-8: Verteilung Anteile Faserarten an Gesamtmenge weltweit [Statista Anteil Faserarten, 2022]

## Naturfasern

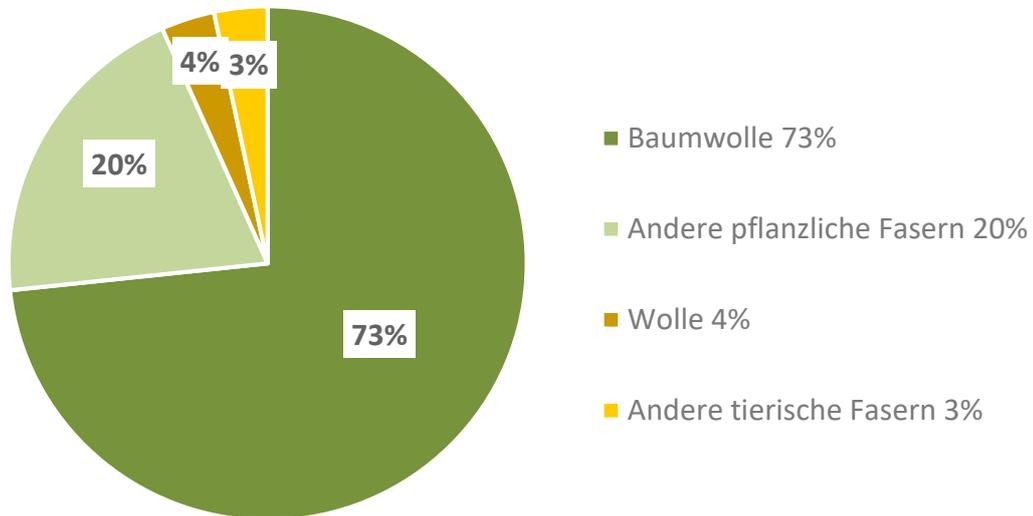


Abbildung 3-9: Verteilung Anteile Naturfasern

## Chemiefasern

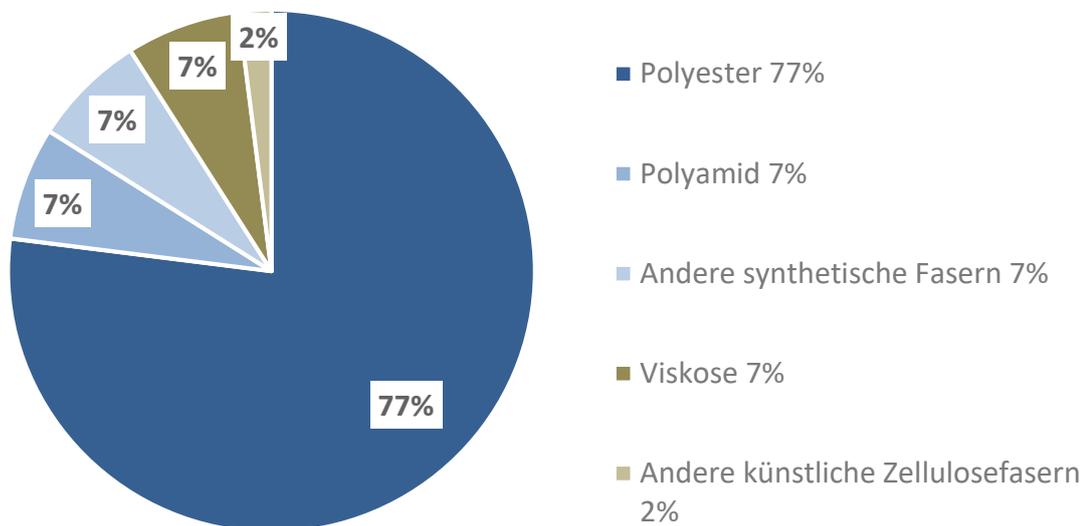


Abbildung 3-10: Verteilung Anteile Chemiefasern

Die Absolutwerte der Faserproduktion und auch weiterer Mengendarstellungen im Verlauf dieser Studie sind nur als Richtwerte zu verstehen. Die Auswertung verschiedener Quellen zeigten abweichende Werte der Produktionsmengen. Die Unterschiede waren marginal (<2%) und sind daher für weitere Betrachtungen unerheblich. Allen Quellen gemein ist ein deutlicher

Wachstumstrend hinsichtlich der Produktion von Chemiefasern. Mengenmäßig der größte Anteil und auch das höchste Wachstum ist bei Polyester zu verzeichnen, gefolgt von cellulosischen Chemiefasern. Unter den Naturfasern ist weiterhin die Baumwolle am stärksten vertreten. Deren Ausbau von Anbauflächen und Ertrag wächst im Verhältnis zur Gesamtfaserproduktion auf niedrigem Niveau, bzw. stagniert sogar (Abbildung 3-11).

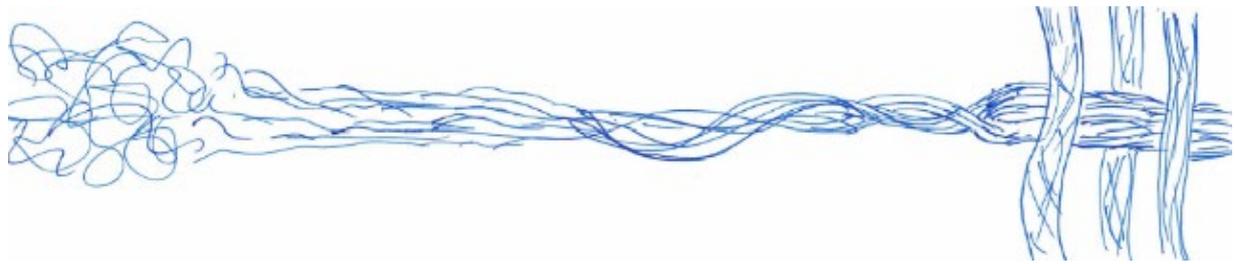


Abbildung 3-11: Erntemengen in Millionen Baumwollballen, ca. 218 kg/pro Baumwollballen, [Statista Erntemengen, 2022]

### 3.3 Verfahrenstechnik und Herstellungsprozesse von Textilien

So vielfältig die Materialzusammensetzungen und Einsatzgebiete von Textilien sind, so komplex sind auch die Routen der Herstellung. Bis eine Faser im fertigen Textil seiner Bestimmung nachkommt, durchläuft sie verschiedene Stufen der Wertschöpfungskette.

Ausgehend von dem Primärrohstoff Naturfaser beginnt die Entwicklung einer Faser zu einer textilen Fläche bereits in der Landwirtschaft. Anbau- und Weideflächen sind aufgrund von verschiedenen Klimazonen und dem Bevölkerungswachstum begrenzt und so führt die steigende Nachfrage nach Faserstoffen auch zur Erhöhung der Chemiefaserproduktion. Unabhängig davon, welche Fasern - ob Natur- oder Chemiefasern - in die Produktionskette gegeben werden, folgen die Stufen bzw. Verarbeitungsschritte, außer bei der Vliesherstellung, immer dem gleichen Prinzip:



Fasern parallelisieren	Spinnen	Flächenherstellung
------------------------	---------	--------------------

Abbildung 3-12: Darstellung vom Faserknäuel über das Spinnen zur textilen Fläche

Die Vlies- oder Filzherstellung nimmt eine Sonderstellung ein. Hier werden die Fasern nicht erst zu einem Garn versponnen, sondern gleich nach dem Parallelisieren verfestigt und zur textilen Fläche, dem Vlies oder Filz, verarbeitet. Die Verfestigung des Filzstoffes erfolgt typischerweise mechanisch durch Walken oder Vernadeln.

Beim Filzen von Wolle, dem Walken, werden die Fasern durch Wärme, Druck und Reibung verfestigt. Vliese können neben der mechanischen Methode auch chemisch (durch Binde- oder Lösemittel) oder thermisch (schmelzen, verschweißen) konsolidiert werden.

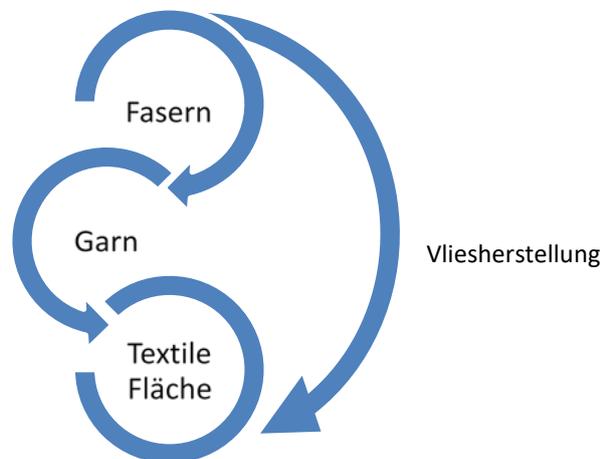


Abbildung 3-13: Schematische Darstellung von den Fasern zur textilen Fläche

Für alle weiteren Textilien werden die losen Fasern aufbereitet und folgen dann, entsprechend dem finalen Produkt, einer bestimmten Herstellungsrouten. In jeder Fertigungsstufe sind unterschiedliche Produktionsprozesse und Maschineneinsätze möglich, die die Faser über den Faden in eine textile Fläche bringt. Die wesentlichen Produktionsstufen und Herstellungsverfahren sind im nachfolgenden Flussdiagramm dargestellt und kurz erklärt:

### Rohstoffe



Zunächst werden die Rohstoffe in Form natürlicher Materialien oder als Kunststoffe zu Fasern verarbeitet. Je nach Herkunft und Art der Ausgangsmaterialien sind verschiedenen Verarbeitungsstufen notwendig, um die Fasern zu gewinnen. Die Fasern werden zunächst geöffnet und gereinigt. Ein wichtiger Aspekt, bevor ein Garn gesponnen wird, ist die Parallelisierung der einzelnen Fasern zu einem Streckband, welches der Spinnmaschine vorgelegt werden kann.

### Spinnereivorbereitung

Faseröffnung

Reinigung

Parallelisieren

Strecken



Naturfasern liegen als Stapelfasern vor, d.h. die einzelnen Fasern haben eine endliche Länge. Synthetisch hergestellte Fasern sind entweder endlose Filamente oder werden ebenfalls zu Stapelfasern verarbeitet. Die kurzen Fasern werden in vielen Prozessschritten zunächst parallelisiert, dem Kardieren oder bei Wolle auch Krempeln genannt, bis sie zu einem losen Faserkörper mit geordneten Einzelfasern, dem Band, gestreckt werden.

### Spinnerei



Ringspinnen

Rotorspinnen

Lösungsspinn-  
verfahren

Schmelzspinn-  
verfahren

Dispersions-  
spinnverfahren

Das Streckband dient als Vorstufe zur Garnherstellung, dem Spinnen. Hier wird das Vorgarn durch weiteres Verstrecken und Drehen zu einem Faden gesponnen. Stapelfasern werden im Ring- oder Rotorspinnverfahren zu einem Garn verarbeitet. Kunststoffe werden zunächst in verschiedenen Verfahren aufgelöst und zu Endlofasern gesponnen, die dann wiederum als Stapelfasern zu Garnen versponnen werden können.

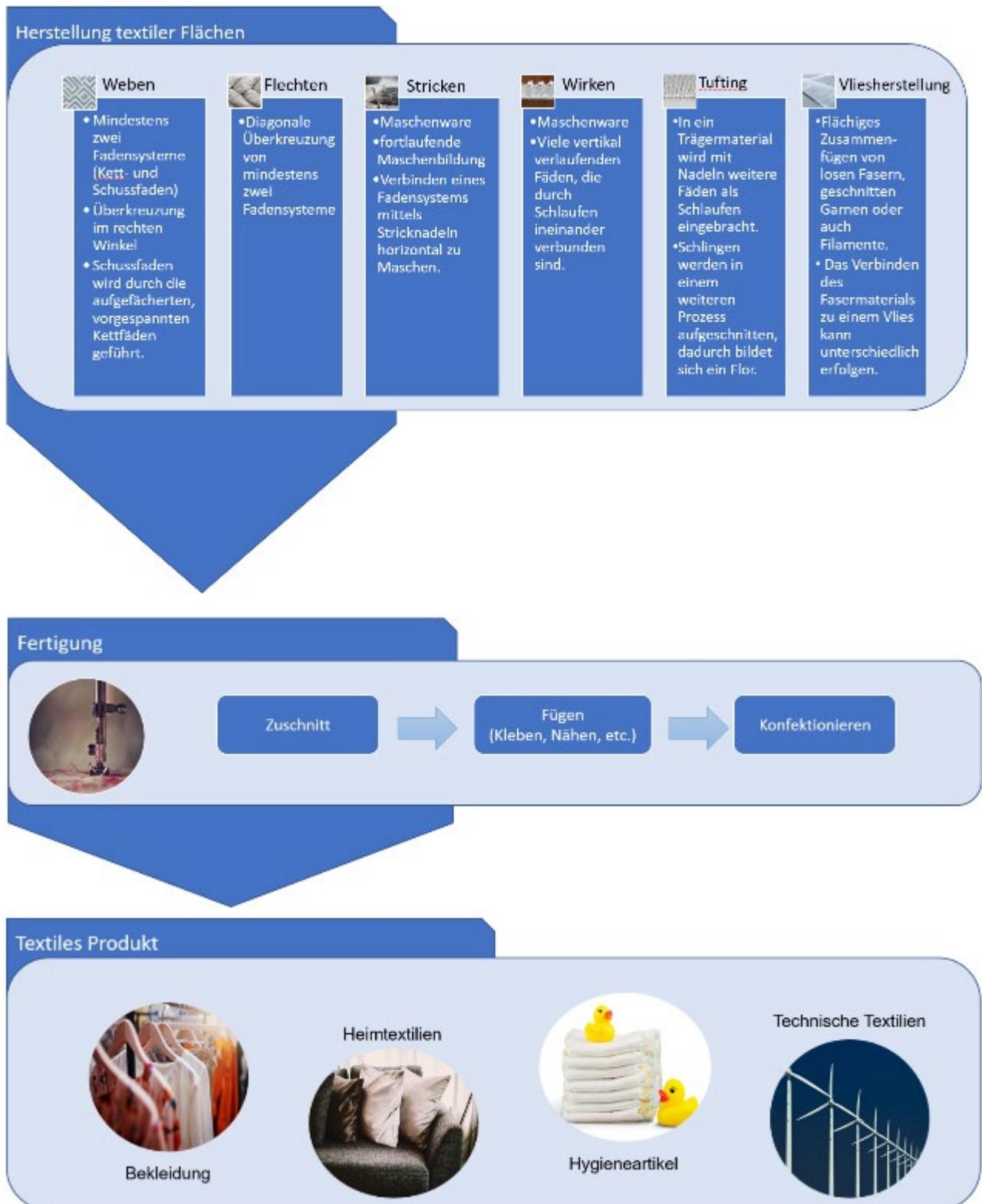


Abbildung 3-14: Schema der textilen Verarbeitungskette

Die Ausrüstung, bzw. Veredlung der Zwischen- und Endprodukte erfolgt je nach Bestimmung und Einsatz der Textilien entweder fortlaufend oder zwischen den einzelnen Prozessstufen. Die Einordnung erfolgt in der Art der Ausführung. Grob wird zwischen chemischer, thermischer und mechanischer Veredlung unterschieden.

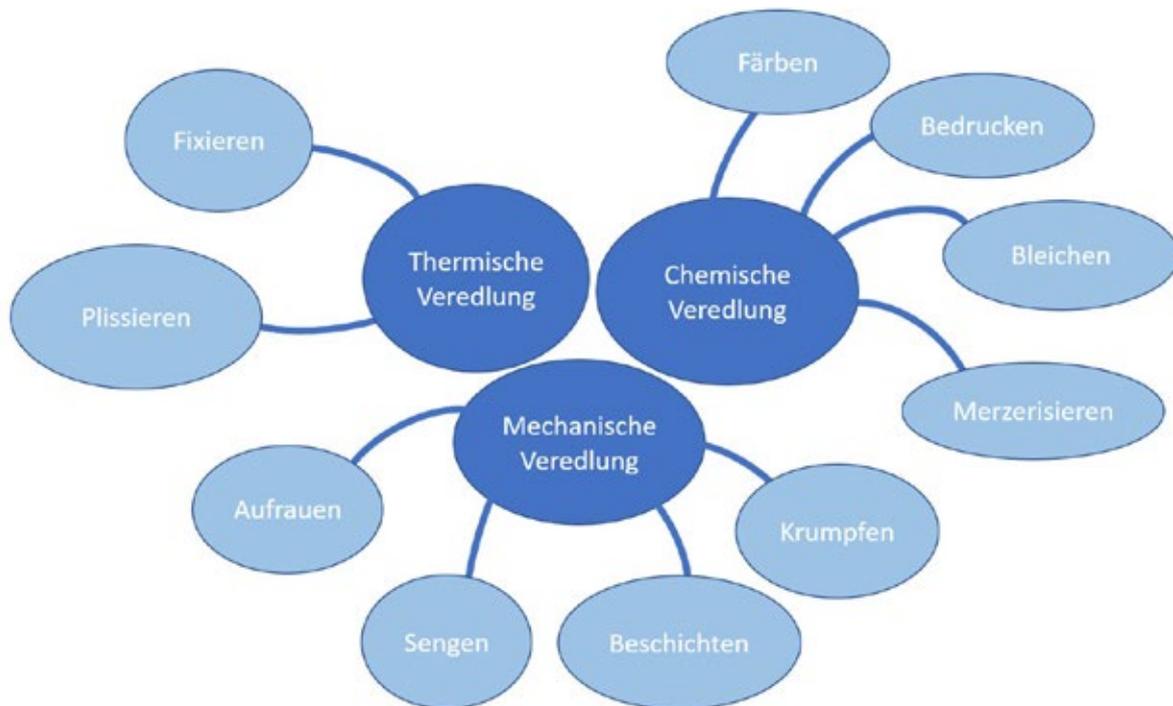


Abbildung 3-15: Überblick Beispiele Textilveredlung

Im Bereich der technischen Textilien werden zusätzliche Verarbeitungsschritte durchgeführt. Neben technischen Vliesen, Filterwaren und Windeln haben Faserverbundwerkstoffe eine große Bedeutung. In Verbindung mit einer Matrix, in denen die Fasern, bzw. die textilen Flächen eingebettet sind, wird von Faserverbundwerkstoffen gesprochen.

Faserverbundwerkstoffe finden heute in unterschiedlichen Bereichen ihren Einsatz, z. B. als Rotorblätter und Gondeln von Windkraftanlagen, Bauteile im Fahrzeugbau, Röntgenbauteile in der Medizintechnik, Luft- und Raumfahrt.

Als Verstärkungsfasern kommen hauptsächlich Glasfasern (Glasfaserverstärkter Kunststoff, GFK), Kohlenstofffasern (Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff, CFK, bzw. umgangssprachlich Carbon) und Aramidfasern (Aramidfaserverstärkter Kunststoff, AFK) zum Einsatz.

Die Fasern werden in verschiedenen Prozessschritten in Matrixwerkstoffe eingebettet. Dafür werden überwiegend folgende Materialien verwendet:

- Kunststoffe (Thermoplaste, Elastomere, Duromere, wie Duroplaste und Kunstharze)
- Zement und Beton
- Metalle
- Keramiken
- Kohlenstoff (kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff = CFC)

### 3.4 Energieaufwand bei der Herstellung von Primärtextilien

Die Textilherstellung ist eine globale Industrie und die Wege der Zwischenprodukte umspannen den gesamten Erdball. Der Energieaufwand und die Kosten pro Tonne Primärtextil unterliegen vielen Einflussfaktoren. So sind zunächst die Stationen und Routen von Faserstoffen bis zum konfektionierten Textil zu ermitteln. Bereits ausgeführt ist die Komplexität der textilen Prozesskette und Ausgangsmaterialien. Hinzukommend sind noch Unterschiede der Prozessausführung in den einzelnen Ebenen.

Exemplarisch sind hier der Energieaufwand und die damit zusammenhängenden Produktionskosten in der Baumwollspinnerei zu nennen. Bei gleichem Rohstoff gibt es signifikante Unterschiede bei der Art der Ausspinnung, z. B. Rotor- oder Ringspinnerei, und der ersponnenen Garnfeinheit, die sich auf die Kosten und den Energiebedarf auswirken. So sind grobe Garne aufgrund ihrer kürzeren Maschinenlaufzeiten günstiger in der Herstellung als hochfeine und hochgedrehte Garne. Weiter in der Flächenherstellung, wie z. B. beim Weben oder Stricken, steigt der Energiebedarf mit der Komplexität und Feinheit der Ausführung. Wobei das Weben, inklusive der Webereivorbereitung und Maschineninvestition, das Stricken auf der Kostenseite weit übertrifft.

In der Literatur gibt es zum Energieverbrauch zur Herstellung von Textilfasern unterschiedliche Angaben. Abhängig von den herangezogenen Ausgangsmaterialien, fossil oder biosbasierte Kunststoffe, ist die Spanne der verbrauchten Energie pro Tonne Polyester zwischen 51 GJ und 125 GJ angegeben. Bei Baumwolle liegen die Werte zwischen 55 GJ und 69 GJ pro Tonne Fasern. [SWiTex 2021, Probas 2022]

Näherungsweise können für häufig hergestellten Fasern die in Tabelle 3-2 dargestellten Werte für den Energieaufwand angegeben werden.

Tabelle 3-2: Faserarten und ihr Energieaufwand bei der Herstellung

Faserart	Energieaufwand [GJ/t]
PES	125
PA	250
PP	115
PAN	175
CV	100
Baumwolle	55
Schurwolle	63
Flachs	10
Kohlenstofffaser	330

Bis ein textiles Produkt in den Handel kommt, werden die zuvor aufgeführten Produktionsschritte durchlaufen. Differenzen im Energiebedarf, CO<sub>2</sub>- und Flächenfußabdruck während der Herstellung von Endprodukten sind vorhanden. Die Einflussfaktoren in den verschiedenen Prozessstufen sind zu unterschiedlich und auch abhängig von Produktionsstandards, -standorten und den dort herrschenden Sozialstandards.

Übereinstimmend ist festzuhalten, dass die textile Produktion mit einem erheblichen Rohstoffverbrauch sowohl von fossilen als auch natürlichen Rohstoffen und Energieaufwand verbunden ist. Neben dem Energieaufwand geraten bei Baumwolle auch der hohe Wasserverbrauch, der Einsatz von Pestiziden und der Flächenfußabdruck immer wieder in Kritik.

### 3.5 Wirtschaftliche Entwicklung der Textil- und Bekleidungsindustrie in Bayern

Im Gebiet des heutigen Freistaats Bayern pflegt die Textil- und Bekleidungsindustrie eine lange Tradition, die bis Ende des 17. Jahrhunderts zurückzuführen ist. Zunächst entstanden Manufakturen, die sich in den Gebieten Mittel- und Oberfrankens und auch Schwabens konzentrierten. Mit Karl Uwe Forster und der Kattundruckerei Schöppler & Hartmann (1788-1877) erlangte Augsburg eine bedeutende Stellung und entwickelte sich mit der Ansiedlung weiterer Baumwollspinnereien und -webereien zum Zentrum der Textilindustrie in Süddeutschland. Der Industriezweig wurde somit zum dominanten Wirtschaftssektor in Bayern.

Bis zum Ersten Weltkrieg nahm die Produktionskapazität und die Expansion der Textilindustrie stetig zu. Beide Weltkriege und die Zeit dazwischen mit der Weltwirtschaftskrise 1929/30 brachten die starke Textilindustrie ins Wanken. Durch die Zerstörung im Zweiten Weltkrieg kam in Teilen Bayerns dieser Wirtschaftssektor dann zum völligen Erliegen.

Erneuten Aufschwung gab es mit der Währungsreform 1948 erst nach dem Krieg. Bis ins Jahr 1957 zählte die bayerische Textilindustrie insgesamt 119.688 Beschäftigte, 15% davon allein in Augsburg. [Karl B. Murr] Der Erfolg der Nachkriegsjahre konnte Ende der Fünfzigerjahre nicht weitergeführt werden. Die Importe von Textilien und Bekleidung stiegen stetig und übertrafen die Exporte. Die deutsche und auch bayerische Textil- und Bekleidungsindustrie befindet sich nunmehr, seit 1970, in einem nachhaltigen Strukturwandel, der mit einer relativen Verschlechterung ihrer Position, sowohl auf dem Weltmarkt für Textilien und Bekleidung als auch im Vergleich zu anderen Branchen im Inland, einhergeht. So hat die deutsche Textil- und Bekleidungsindustrie seit 1970 etwa neun Zehntel ihrer Betriebe und Beschäftigten verloren. Dies betrifft vorrangig die Baumwollverarbeitung sowie die auf Bekleidungstextilien ausgerichtete Textilproduktion. Lediglich einige Hersteller hochwertiger Textilien und von Sport- und Medizinartikeln konnten sich in Deutschland behaupten sowie der Bereich technischer Garne, der sogar Wachstumspotenziale aufweist. [BMWK, 2022]

In Bayern schrumpfte der textile Wirtschaftssektor bis ins Jahr 2010 auf nur noch ca. 13.400 Mitarbeiter [Karl B. Murr]. 2021 betrug der Branchenumsatz der deutschen Textilindustrie 11,8 Mrd. EUR, davon ca. 39% in Bayern, womit allerdings die Textilindustrie die zweitgrößte Konsumgüterbranche in Deutschland repräsentiert [BMWK, 2022]. Im Bekleidungsbereich werden hauptsächlich fertig konfektionierte Produkte importiert. Immerhin wurden im Bereich der technischen Textilien 330.000 t Fasern (86% Import) zur Produkterzeugung in Deutschland eingesetzt. [TechTex, 2022]

Hauptgrund für die schlechte Situation bezüglich der textilen Produktion ist die erheblich günstigere Kostenstruktur bezüglich der Löhne in Wettbewerbsländern in Asien, auch wenn dieser Einfluss durch hohe Automatisierung dort abnimmt. Die dominanten Materialkosten - häufig subventioniert - erzeugen nach wie vor einen großen Vorteil bei Naturrohstoffen als auch bei synthetischen Fasern.

Im Jahr 2021 sind laut Industriebericht 2022 der bayerischen Textil- und Bekleidungsindustrie ca. 20.475 Beschäftigte in 196 Betrieben zuzurechnen [IndBer, 2022]. Profitierend von dem Innovationsmarkt technischer Textilien stieg allein der Umsatz der bayerischen Textilindustrie in den letzten zwei Jahren leicht von 2,6 Mrd. € im Jahr 2020 auf 2,8 Mrd.€ 2021. Wird die Herstellung von Bekleidung, Leder und Schuhen hinzugezählt ist der Gesamtumsatz mit 5 Mrd. € anzugeben. [IndBer, 2022]

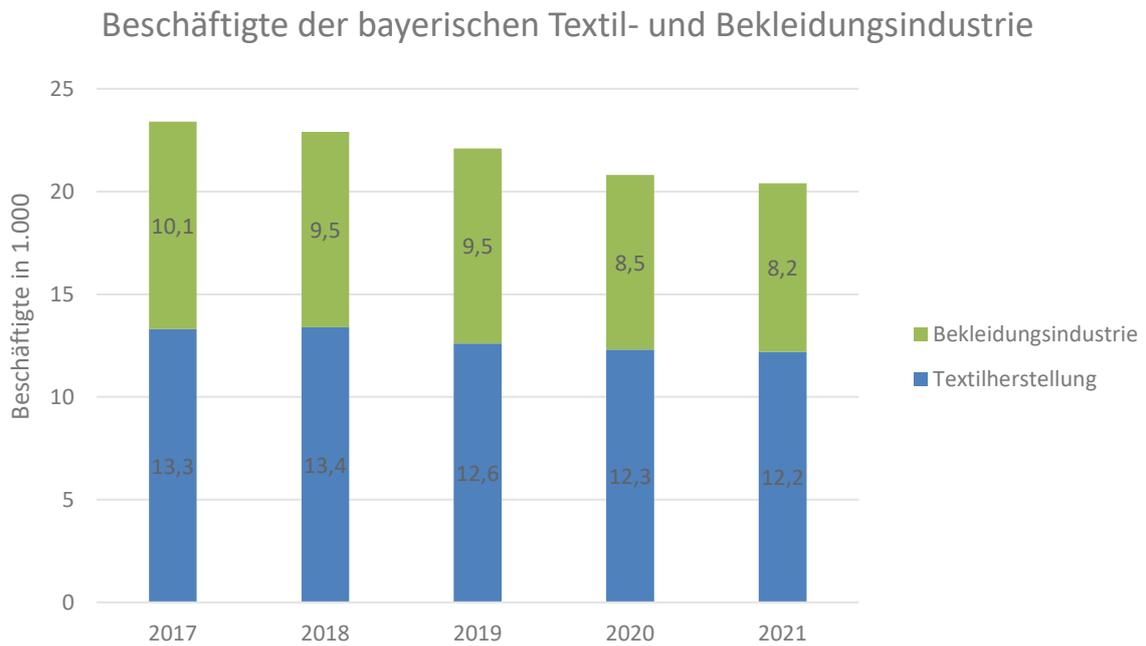


Abbildung 3-16: Beschäftigte der bayerischen Textil- und Bekleidungsindustrie [IndBer, 2022]

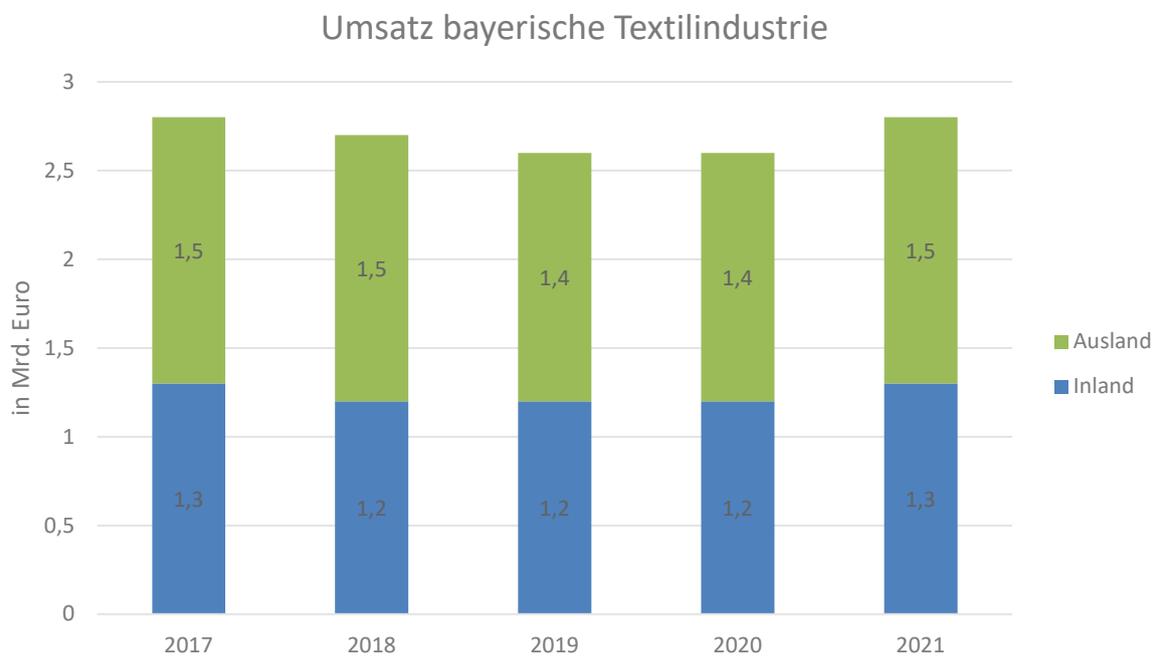


Abbildung 3-17: Umsatz bayerische Textilindustrie [IndBer, 2022]

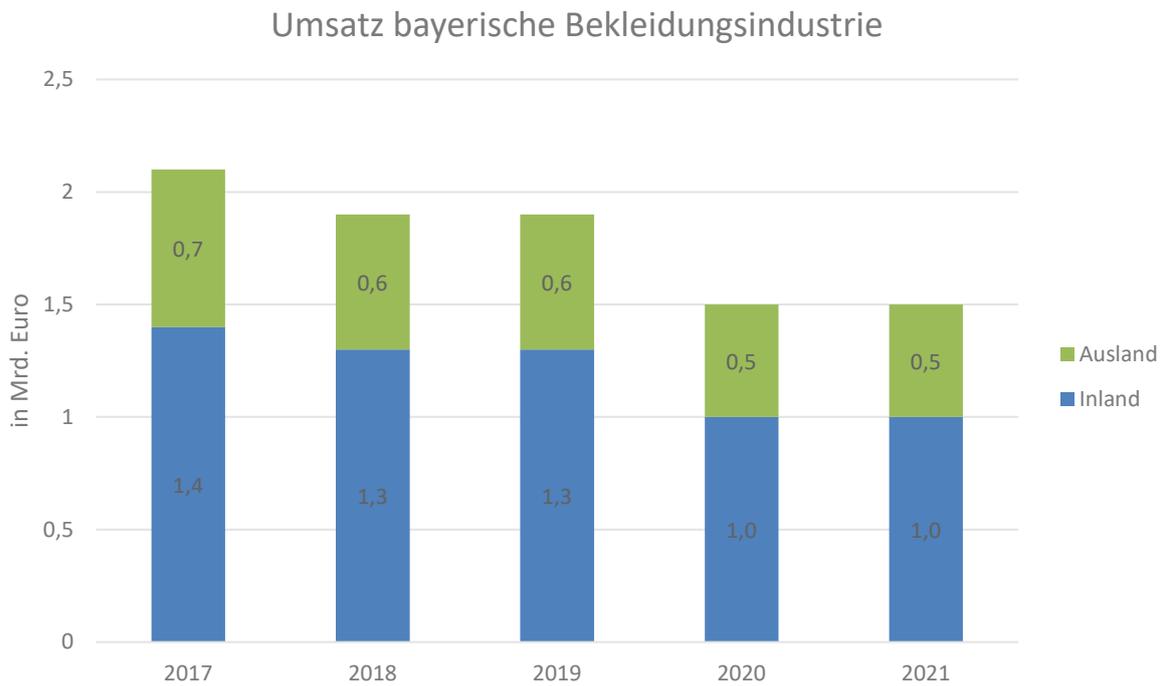


Abbildung 3-18: Umsatz bayerische Bekleidungsindustrie [IndBer, 2022]

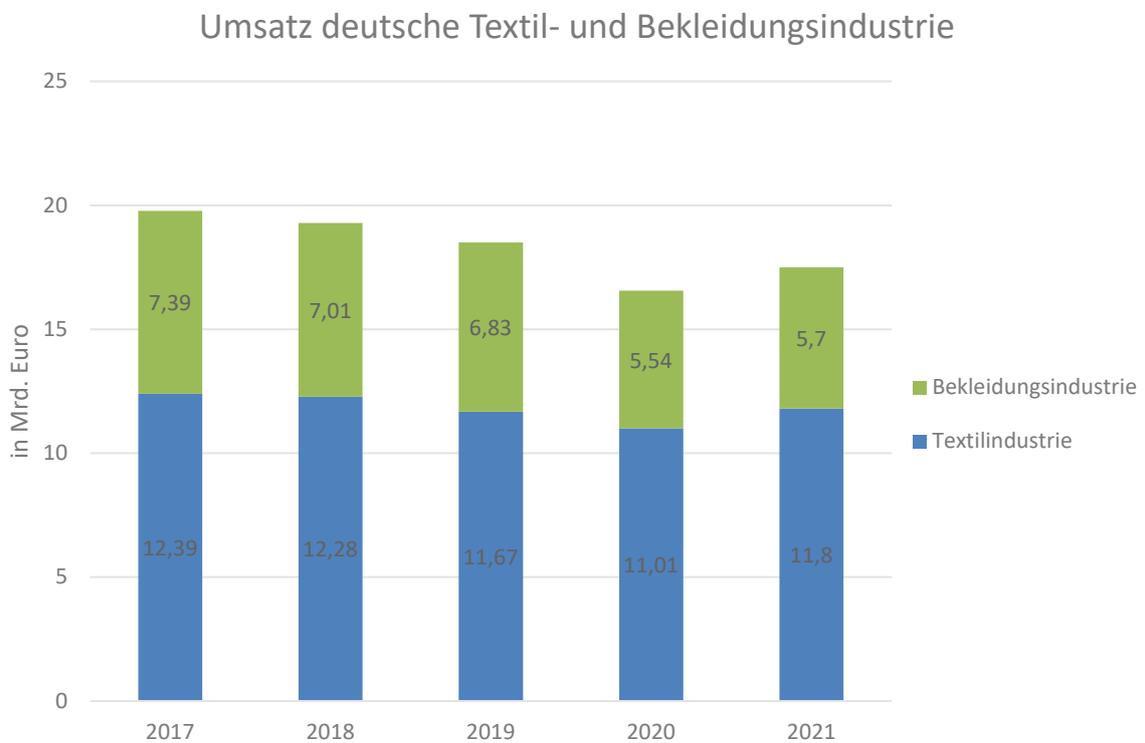


Abbildung 3-19: Umsatz deutsche Textil- und Bekleidungsindustrie [Statista Umsatz, 2022]

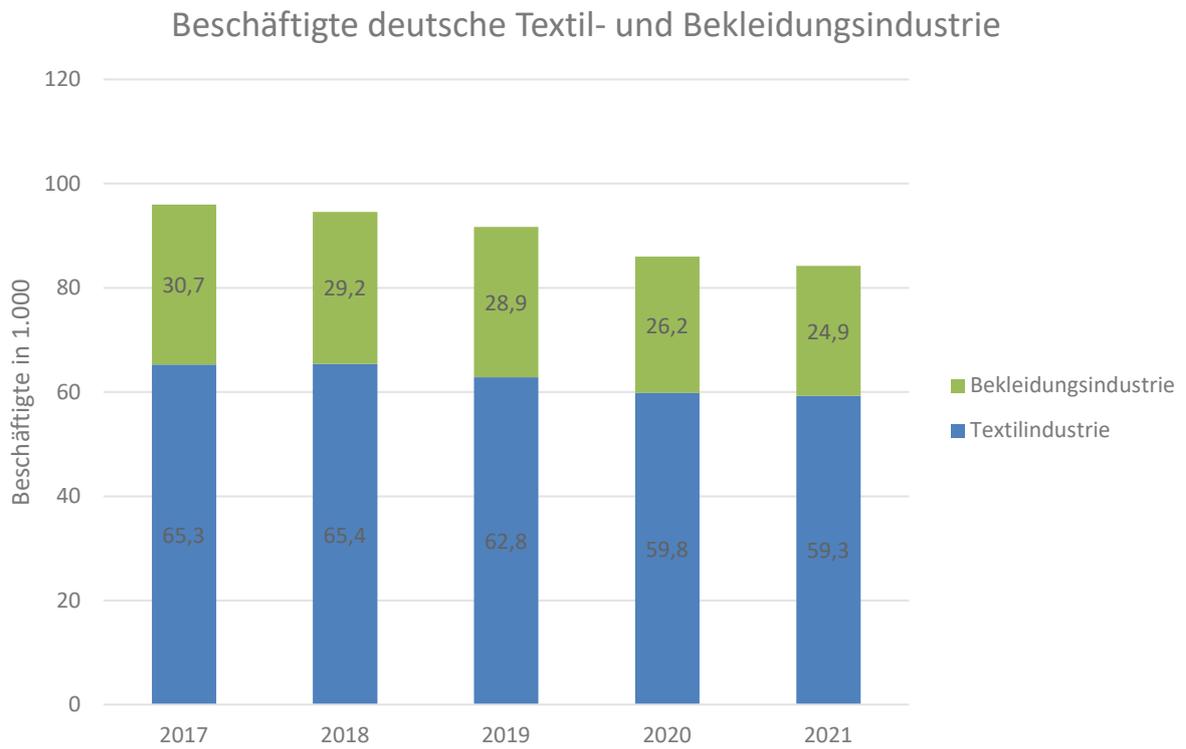


Abbildung 3-20: Beschäftigte deutsche Textil- und Bekleidungsindustrie [Statista Textil, 2022]

## 4 Textilabfallaufkommen

### 4.1 Textilabfälle weltweit

Das derzeitige System für die Herstellung, den Vertrieb und die Verwendung von Textilien basiert überwiegend auf einem "take-make-dispose"-Modell. Große Mengen nicht erneuerbarer Ressourcen werden für die Herstellung von Textilien entnommen, die oft nur kurze Zeit genutzt werden und danach größtenteils auf Mülldeponien oder in Verbrennungsanlagen landen. Verlässliche Zahlen über das weltweit gesamten textile Abfallaufkommen sind nicht verfügbar. Dies liegt zum einen an der beschriebenen Vielfältigkeit der textilen Produkte, die nach ihrer Verwendung im Abfall auch nicht mehr zwangsläufig als Textil erkennbar sind. Zum anderen fehlt es an statistisch erfassten Daten zum Textilabfall. Dies gilt vor allem für technischen Textilien wie zum Beispiel Composites, die nach ihrer Verwendung nicht mehr als Textilien zu erkennen sind.

17% der weltweiten Faserproduktion werden für die Herstellung von technischen Textilien verwendet. [Euratex, 2022]

Auch im Bereich der Bekleidung sowie Haus- und Heimtextilien gibt es keine genauen Kenntnisse zu Abfallzahlen. Nach Schätzungen umfasste allein das Abfallaufkommen der Bekleidungsindustrie im Jahr 2015 rund 92 Millionen Tonnen weltweit. Zudem wurde eine Zunahme von 60% im Verlauf der Jahre zwischen 2015 und 2030 prognostiziert [Global Fashion Agenda, 2017].

Eine Auswertung für Bekleidung der Ellen MacArthur Foundation geht hingegen für das Jahr 2015 von 53 Mio. t Fasern für die Textilproduktion aus. Nur 13% der Textilfasern wurden recycelt und weniger als 1% zu einem closed loop Recycling überführt. Closed loop bedeutet ein Recycling auf gleicher Qualitätsstufe. 87% der gesamten Faserproduktion für Bekleidung wurden thermisch verwertet oder deponiert. Davon gehen 10% bei der Herstellung und 2% bei der Sammlung und Sortierung verloren. 2% der Bekleidung wird vor der Verwendung bereits deponiert. Nach der Verwendung werden 73% der Bekleidung deponiert oder thermisch verwertet. Abbildung 4-1 stellt die weltweiten Materialströme für Bekleidung im Jahr 2015 dar. [Ellen MacArthur Foundation, 2017]

Die Produktion, der Verbrauch und somit auch der Abfall von Textilien variieren stark zwischen den einzelnen Ländern. Abbildung 4-2 stellt die jährliche pro Kopf Menge an Textilabfall, die nicht mehr stofflich verwertet wird, für das Jahr 2016 in den USA, China, Hongkong, EU, Frankreich und dem Vereinigten Königreich dar.

Die deponierte Abfallmenge liegt zwischen 29,3 kg/(Ew\*a) in den USA und 5,3 kg/(Ew\*a) im Vereinigten Königreich [Bukhari et al. 2018]. Für die EU wird eine Menge von 9,6 kg/(Ew\*a) angenommen.



Abbildung 4-1: Weltweite Materialströme für Bekleidung im Jahr 2015 [Ellen Mc Arthur Foundation, 2017]

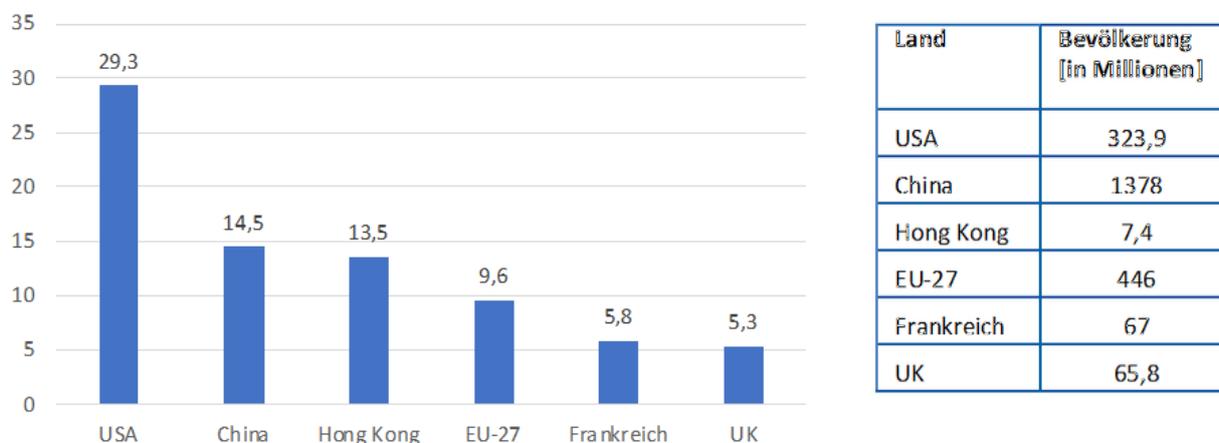


Abbildung 4-2: Schätzwerte der Mengen deponierter Textilien im Jahr 2016 in [kg/(Ew\*a)] (nach [Bukhari et al. 2018])

Neben dem unterschiedlichen Konsum liegt dies auch an der unterschiedlichen Erfassung und Sammlung von Textilien in den jeweiligen Ländern. Im Rahmen der Studie „Circular economy perspectives in the EU Textile sector“ des Joint Research Center [JRC 2021] werden die Materialströme und Verwertung von Post-Consumer Textilien in Europa betrachtet. Schätzungen zufolge wurden in der EU jährlich zwischen 1,7 und 2,1 Millionen Tonnen Alttextilien gesammelt. Man geht davon aus, dass der Großteil der verbleibenden 3,3 bis 3,7 Millionen Tonnen in gemischten Haushaltsabfällen entsorgt wurden, wobei eine wesentlich geringere Menge in wachsenden Lagerbeständen in den Haushalten gelagert wurde. [JRC, 2021]

In Tabelle 4-1 ist der Konsum und die separate Sammlung von Bekleidung sowie Haus – und Heimtextilien der jeweiligen Länder innerhalb der EU dargestellt. Der sichtbare Pro-Kopf-Verbrauch an neuer Bekleidung und Textilien variierte zwischen den Ländern um den Faktor drei.

*Tabelle 4-1: Verbrauch und getrennte Sammlung von Alttextilien in der EU [JRC, 2021]*

Länderkennzeichen		AT	CZ	DE	DK	EE	FI	Fla.	FR	IT	LT	LV	NL	SE
Datenjahr		2018	2013	2018	2016	2018	2012	2019	2019	2018	2018	2018	2018	2013
Verbrauch von neuen Textilien	Kilo-Tonnen	---	69	1715	85	16	72	---	648	1383	19	12	305	121
	kg/Person	---	6,6	20,7	15	12,4	13,2	---	9,7	22,8	7	6,1	17,7	12,6
Getrennte Sammlung von Alttextilien	Kilo-Tonnen	38	20	1271	37	4,8	16	55	249	146	2,1	0,5	136	23
	kg/Person	4,3	1,9	15,3	6,4	3,7	3	8,3	3,7	2,4	0,8	0,3	7,9	2,4
Sammelquote*	%	---	30	---	43	30	23	---	38	11	11	4,5	45	19

\*Die Sammelquote ist definiert als die gesamte getrennte Sammlung von Alttextilien geteilt durch die Gesamtmenge der in Verkehr gebrachten Textilien. Bitte beachten Sie, dass die Zahlen in dieser Tabelle aufgrund von Unterschieden in der Methodik und im Erfassungsbereich nicht unmittelbar zwischen den Ländern vergleichbar sind.

Diese Kluft beruht nicht nur auf differierenden Durchschnittseinkommen, sondern auch auf kulturellen Unterschieden. So wurden in Frankreich, das ein ähnliches Pro-Kopf-BIP wie Italien hat, weniger als die Hälfte der Textilien verbraucht. Darüber hinaus bestehen Unterschiede in der Datenerhebung und dem Bezugsjahr der erfassten Daten. [JRC, 2021]

Auch bei der Sammlung von Alttextilien gibt es erhebliche Unterschiede. Ein Teil dieses Unterschieds ist auf die unterschiedlichen Mengen an neuen Textilien zurückzuführen, die auf den Markt gebracht werden, aber auch die Sammelquoten [getrennte Sammlung als Anteil der auf den Markt gebrachten neuen Textilien] sind sehr unterschiedlich und reichen von nur 4,5% in Lettland bis zu 45% in den Niederlanden. [JRC, 2021] Dies liegt auch am unterschiedlichen ökonomischen Wert der gesammelten Alttextilien. So ist zum Beispiel der Wert des Sammelguts und damit das Interesse zur getrennten Sammlung in wirtschaftlichen stärkeren Ländern wie Deutschland deutlich größer.

Nur von vier Ländern ist bekannt, dass sie jährlich über die getrennte Sammlung von Post-Consumer-Textilien berichten: Frankreich, Belgien (nur die Region Flandern), Österreich und Italien. Die beiden letztgenannten Länder erfassen nur die Sammlung über Sammelstellen (Textilabfälle), nicht aber die Sammlung von Post – Consumer Textilien über andere Wege. Dänemark, Schweden und die Niederlande verfügen über Daten aus zwei Jahren. [JRC, 2021]

Eine Sammelquote für Deutschland wird im JRC Report nicht angegeben, da die Daten aus Hochrechnungen aus dem Verbrauch und unbegründeten Annahmen und veralteten Daten über die Abfallerfassung, statt auf Erhebungen bei den Sammelorganisationen beruhen. Deshalb geht der JRC Report von einer überschätzten Sammelmenge aus. [JRC, 2021]

Daten zu Textilien im Restabfall, zu Sammelquoten in Deutschland und zu weiteren textilen Abfallströmen in Deutschland werden im Folgenden genauer betrachtet.

## 4.2 Textilabfälle im Restabfall in Deutschland und Bayern

Im Rahmen dieser Studie werden hauptsächlich Post-Consumer Abfälle betrachtet, da Pre-Consumer Abfälle aufgrund der geringeren Verschmutzung und besseren Kenntnisse über die Materialzusammensetzung stärker für ein werkstoffliches Recycling geeignet sind. Unter Post-Consumer Abfällen werden Abfälle verstanden, die bereits den Nutzungszyklus des Verbrauchers durchlaufen haben. Pre-Consumer-Abfälle hingegen entstehen bei der Herstellung oder Lieferung von Waren vor deren Auslieferung an den Verbraucher.

Es gibt kaum Daten und Literatur zu textilen Abfallmengen in Deutschland. Aufgrund der beschriebenen Vielfältigkeit von textilen Produkten, ist eine Erfassung über Abfallschlüsselnummern meist nicht möglich.

Abbildung 4-3 fasst die textilen Abfallströme für Deutschland zusammen. Diese Daten basieren auf Annahmen und Schätzungen und sind deshalb mit Vorsicht zu betrachten, da es bis heute an bundesweit statistisch erfassten Daten zur Zusammensetzung und dem Verbleib von Alttextilien in Deutschland fehlt. [UBA, 2022]

Die Produktionsabfälle werden in Deutschland auf 280.000 t geschätzt [Tex Cycle, 2022]

Der Fokus dieser Studie liegt jedoch auf den textilen Abfällen, die nicht stofflich verwertet werden, da diese potenziell für die Wasserstoffherzeugung in Frage kommen. Wie in der fünfstufigen Abfallhierarchie [§ 6 KrWG] festgelegt, ist stoffliches Recycling der Wasserstoffherzeugung stets vorzuziehen.

In Deutschland werden 1 bis 1,2 Mio. t Altkleider und Heimtextilien getrennt über Altkleidersammlung erfasst [UBA, 2022]. Vom Sammelgut werden 60% wiederverwendet, 27% stofflich recycelt und 11,5% thermisch verwertet. [BVSE, 2020]

Restabfall-Sortieranalysen, die im Auftrag von Landkreisen, Städten und Abfallwirtschaftsverbänden, dem LfU sowie dem Umweltbundesamt durchgeführt wurden, ergaben auf Deutschland hochgerechnet eine Menge von 373.500 bis 514.600 t Textilabfälle im Restabfall.

Darüber hinaus wurden die textilen Bodenbeläge und Matratzen als potenzielle Abfallströme für die Wasserstofferzeugung ausgemacht. In Deutschland werden über den Sperrmüll 225.000 t Matratzen und 225.000 t textile Bodenbeläge separat erfasst.

Noch nicht betrachtet wurden vor allem technische Textilien, Hygieneabfälle und Baustellenabfälle, weil auf Grund der nicht vorhandenen Daten nur Schätzungen möglich sind.

In der über getrennte Sammlung und Hausmüll vorliegenden Daten wird nicht durchgehend zwischen Haus- und Heimtextilien sowie Bekleidung differenziert. Aus diesem Grund wird bei der folgenden Betrachtung nicht nach Art der Textilien unterschieden, sondern nach der Sammelmethode (getrennte Sammlung, Hausmüll, Sperrmüll und Gewerbeabfall).

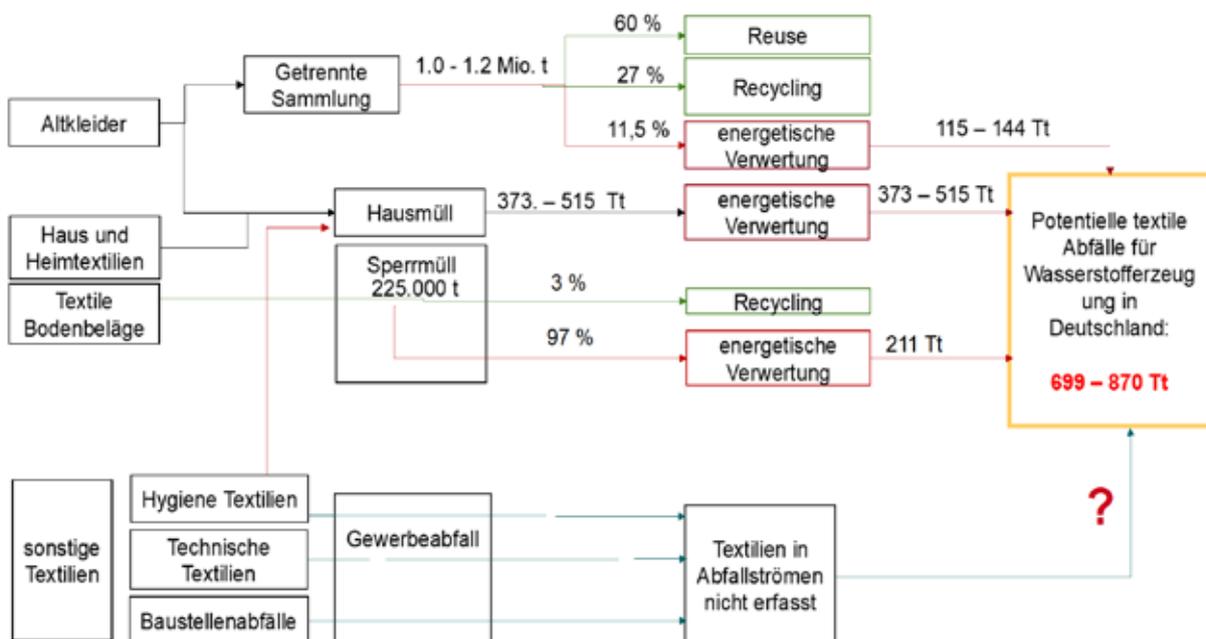


Abbildung 4-3: Textile Abfallströme in Deutschland

#### 4.2.1 Literaturbetrachtung: Textilanteile in Restabfall

Abfallwirtschaftliche Planungen und Entscheidungen setzen in der Regel Kenntnisse über die Art und Zusammensetzung des anfallenden Abfalls voraus. Aus diesem Grund wurden in den letzten 20 Jahren viele Sortieranalysen von Rest- und Bioabfall durchgeführt. Diese wurden hauptsächlich von Ministerien und anderen Behörden sowie insbesondere von

entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften beauftragt. Sortieranalysen dienen u. a. als Grundlage für Überlegungen zur möglichen Optimierung der getrennten Wertstoffsammlung. Im Rahmen dieser Studie wurden Sortiererergebnisse aus offiziellen Quellen wie beispielsweise UBA oder LfU ausgewertet sowie weitere Sortiererergebnisse aus öffentlich zugänglichen Berichten. Darüber hinaus wurden Ergebnisse der von der bifa Umweltinstitut GmbH durchgeführten Restabfall-Sortieranalysen ausgewertet. Hierfür stehen Daten aus Analysen der letzten 20 Jahre zur Verfügung [Datenpool bifa (2022)].

#### 4.2.2 Restabfall-Sortieranalysen der bifa Umweltinstitut GmbH

Die bifa Umweltinstitut GmbH hat in den beiden vergangenen Jahrzehnten zahlreiche Restabfall-Sortierungen auf Kreisebene sowie auf Ebene von Abfallwirtschaftsverbänden durchgeführt. Dabei wurden sowohl ländlich als auch ländlich-dicht sowie städtisch strukturierte Gebiete untersucht. Als textile Fraktionen des Restabfalls wurden *Bekleidungstextilien* und *sonstige Textilien* unterschieden.

- *Bekleidungstextilien* sind Alttextilien, die als Bekleidung genutzt wurden und als solche bei der Restabfallsortierung identifizierbar sind, auch wenn diese nicht mehr tragfähig sind.
- *Sonstige Textilien* sind alle anderen Textilien, d. h. Haus und Heimtextilien, textile Putzlappen, Stoffreste oder auch technische Textilien.
- Schuhe wurden bei den Restabfallsortieranalysen als separate Fraktion erfasst und nicht den Textilien zugeordnet.

In Tabelle 4-2 sind die bei den Sortieranalysen der letzten acht Jahre ermittelten pro Kopf Mengen der im Restabfall enthaltenen Textilabfälle dargestellt. Daraus ergeben sich Mengen zwischen 3,78 kg/(Ew\*a) und 11,0 kg/(Ew\*a). Der Mittelwert liegt bei 6,55 kg/(Ew\*a).

Tabelle 4-2: Ergebnisse der ausgewerteten Sortieranalysen [Datenpool bifa (2022)]

Jahr	Spezifische Textilmenge in kg/(Ew*a)		
	Bekleidung	sonstige	Gesamt
2022	1,73	2,05	3,78
2021	2,70	2,20	4,90
2017	4,33	2,87	7,20
2017	2,73	2,34	5,07
2014	2,31	4,89	7,20
2014	4,20	2,47	6,68
2014	4,93	6,10	11,00

### 4.2.3 Im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt durchgeführte Sortieranalysen

Im Lauf der Jahre 1999 bis 2014 wurden im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt umfangreiche Sortieranalysen von Restabfall und getrennt erfassten Wertstoffen durchgeführt. Weil ein Großteil dieser Analysen mehr als zehn Jahre zurückliegt, werden hier nur die in den Jahren 2014 und 2015 veröffentlichten Ergebnisse vorgestellt. Bei den zugrunde liegenden Forschungsprojekten lag der Schwerpunkt auf dem Einfluss abfallwirtschaftlicher Maßnahmen auf die Rest-Gehalte von Wertstoffen im Restabfall. Es wurden zum Teil Gebietskörperschaften mit sehr geringem spezifischen Abfallaufkommen untersucht, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die hier ermittelten Werte zwischen 2,5 und 4,2 kg/(Ew\*a) eher als gering eingeschätzt werden müssen.

Tabelle 4-3: Ergebnisse ausgewählter Sortieranalysen des Bayerischen Landesamts für Umwelt

Quelle	Spezifische Menge in kg/(Ew*a)	Massen-%
BayLfU (2014), Mittelwert	4,2	4,0
BayLfU (2015), L24	4,0	4,2
BayLfU (2015), L25	2,5	4,5
BayLfU (2015), L26	3,0	6,2

### 4.2.4 Auswertung weiterer veröffentlichter Sortieranalyseberichte

Ergänzend wurden neben den oben dargestellten Sortieranalysen auch Ergebnisse anderer veröffentlichter Sortieranalysen herangezogen. Die recherchierten Anteile und spezifischen Textilabfallmengen im Restabfall werden in Tabelle 4-4 ihren Quellen zugeordnet.

Laut einer Studie für den Landkreis Leipzig (2011) liegt die Gesamtmenge der jährlich im Restmüll anfallenden Textilien bei 923 t/a davon 402 t/a Bekleidungstextilien, 297 t/a sonstige Textilien sowie 224 t/a Schuhe. Der spezifische Anteil in kg pro Einwohner und Jahr lag insgesamt bei 3,4 kg/(Ew\*a) davon waren 1,5 kg/(Ew\*a) den Bekleidungstextilien, 1,1 kg/(Ew\*a) den sonstigen Textilien sowie 0,8 kg/(Ew\*a) auf Schuhe zuzuordnen.

Die Stadt Wasserburg am Inn hat im Jahr 2011 eine Hausmüllsortieranalyse durchführen lassen. Der Untersuchungsumfang umfasste den Restabfall aus Haushalten und Geschäften sowie Kleingewerbe. Es zeigte sich, dass jährlich 42 t Alttextilien über den Restmüll entsorgt wurden, darunter 29 t/a Alttextilien und 13 t/a Schuhe. Der spezifische Anteil lag bei

2,4 kg/(Ew\*a) für Alttextilien und 1,1 kg/(Ew\*a) für Schuhe. Eine Restabfall-Sortieranalyse für den LK Augsburg ergab eine Menge an Textilien von 7,4 kg/(Ew\*a).

Die Ergebnisse von Restabfall-Sortieranalysen in der Steiermark aus den Jahren 2018 und 2019 ergaben ähnliche Ergebnisse: im Mittel befanden sich 4,3% Textilien im Restabfall, das entspricht 5,5 kg/(Ew\*a) [TBU 2019]. Im gleichen Zeitraum wurden 4,1 kg/(Ew\*a) Textilien wurden getrennt gesammelt [Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2023]

Tabelle 4-4: Quellen und Ergebnisse der ausgewerteten Sortieranalysen

Quelle	Spezifische Menge in kg/(Ew*a)	Massen%
LK Augsburg [2012]	7,4	4,2
Rheingau-Taunus-Kreis [2012]	4,9	5,3
Stadt Wasserburg [2012]	2,4	3,6
Stadt Wasserburg 1997 [Stadt Wasserburg 2012]	3,9	3,7
LK Leipzig [2011]	2,6	3,5
LK Mühldorf am Inn [2006]	4,9	4,2
Steiermark 2018/2019 [TBU 2019]	5,5	4,3

#### 4.2.5 Daten aus den Veröffentlichungen des Umweltbundesamtes

Das Umweltbundesamt veröffentlichte im Jahr 2020 die Ergebnisse einer Vielzahl von Restabfall-Sortieranalysen, die sowohl die unterschiedlichen Siedlungsstrukturen als auch unterschiedliche Abfallwirtschaftssysteme umfassten und als repräsentativ für Deutschland angesehen werden können [UBA, 2020]. Den Ergebnissen zufolge haben Alttextilien im Mittel einen Anteil am Hausmüllgesamtaufkommen von ca. 3,5 M-%. Bei einer spezifischen Menge von ca. 4,5 kg/(Ew\*a) liegt die Gesamtjahresmenge im Hausmüll bei ca. 370.000 Tonnen. Diese Menge setzt sich aus jeweils gleichen Anteilen von ca. 40 M-% Bekleidungstextilien und sonstigen Textilien [z. B. Gardinen, Handtücher, Bettwäsche etc.] zusammen. Die restliche Menge von ca. 1,0 kg/(Ew\*a) entfällt auf Altschuhe und Leder. Die Daten aus der im Auftrag des UBA durchgeführten Studie sind in Tabelle 4-5 zusammengefasst.

Bei den Textilien aus dem Restabfall handelt es sich meist um beschädigte, zerrissene oder stark verschmutzte Textilien. Bei einer separaten Erfassung dieser Materialien würde der überwiegende Teil aber noch in einer stofflichen Verwertung als Dämmstoff oder zur Fasergewinnung genutzt werden können. [UBA, 2020]

Tabelle 4-5: Alttextilien im Hausmüll

Stoffgruppen	Deutschland [kg/(Ew*a)]	Anteil an der Summe der Textilien [Massen-%]
Alttextilien (gesamt)	4,49	100,0
Bekleidungstextilien	1,80	40,0
Sonstige Textilien	1,71	38,1
Altschuhe, Leder	0,97	21,5
Alttextilien im Mittelmüll (10 bis 40 mm)	0,02	0,4

#### 4.2.6 Zusammenfassung textile Abfälle im Restabfall

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die durchgeführten Sortieranalysen im Auftrag von Landkreisen, Städten und Abfallwirtschaftsverbänden, LfU sowie dem Umweltbundesamt folgende Mengen Textilabfälle im Restabfall aufweisen:

- der arithmetische Mittelwert aller ausgewerteten Sortieranalysen liegt bei 5,1 kg/(Ew\*a)
- die Spanne der Mengen liegt zwischen 2,5 und 11,0 kg/(Ew\*a).

Geht man von einer Bevölkerungszahl von 13,08 Mio. Einwohner in Bayern aus und einer Menge von 4,5 (UBA) bis 5,1 kg/(Ew\*a) im Restabfall, so kann von einer Gesamtmenge im Restabfall von rund 60.000 t/a (Literatur-Wert) bis rund 70.000 t/a ausgegangen werden.

Für die weiteren Betrachtungen wird zur Vereinfachung der Wert 70.000 t/a herangezogen.

Tabelle 4-6: Ergebnisse der Reststoffanalysen nach Quellen

	UBA	LfU	Literatur	bifa Datenpool
Mittelwert kg/(Ew*a)	4,5	3,4	4,8	6,6
Spanne kg/(Ew*a)	4,5	2,5 bis 4,2	2,4 bis 7,4	3,8 bis 11,0
Anteil im Restabfall Massen-%	3,5	4,7	4,4	5,8

### 4.3 Getrennte Sammlung von Textilien in Deutschland und Bayern

In Deutschland wird Bekleidung, Haus- und Heimtextilien im Post-Consumer Bereich aus privaten Haushalten auf unterschiedlichste Arten gesammelt. Es wird unterschieden zwischen

- Erfassung auf kommunaler Ebene [26,9%],
- gewerbliche Sammlung [§ 3 Abs. 18 KrWG] [44%],
- gemeinnützige Sammlung [§ 3 Abs. 17 KrWG] [28,6%] und
- freiwillige Rücknahme [§ 26 KrWG] [0,5%].

Die Rücknahme der Textilien erfolgt dabei durch Bringsysteme, an Containerstandplätze, Wertstoffhöfe, Holsysteme oder durch Rückgabe direkt im Geschäft beziehungsweise online (Abbildung 4-4) [HNLUG 2020] [UBA 2022]<sup>1</sup>

Der größte Teil der separat erfassten Altkleider wird in Deutschland durch Altkleidercontainer gesammelt. Im Jahr 2018 waren dies 75,6%. Diese werden sowohl durch Kommunen als auch von gemeinnützigen und gewerblichen Sammlern aufgestellt. 20,4% der Textilien werden an Recyclinghöfen erfasst, wobei dies auch meist über Altkleidercontainer passiert. Die restlichen Sammelmethoden wie Straßensammlung, freiwillige Rückgabe und Abfallsammelbehälter spielen mit zusammen 4% eine untergeordnete Rolle. [UBA 2022] [BVSE 2020]

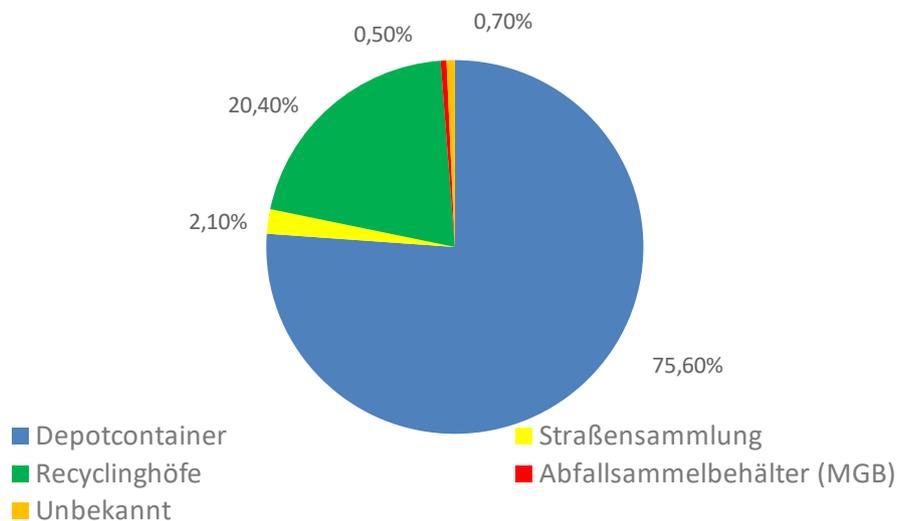


Abbildung 4-4: Sammelsysteme für Bekleidung und Heimtextilien in Deutschland für das Jahr 2018 [UBA 2022]

<sup>1</sup> <https://textile-zukunft.de/wp-content/uploads/2014/10/Textile-Zukunft-Broschüre-der-Gemeinschaft-für-Textille-Zukunft.pdf>

Die illegale Sammlung spielt kaum noch eine Rolle, da der Preis für Alttextilien von 0,45 €/kg in den Jahren 2012 bis 2014 [BVSE 2015] auf 0,29 €/kg im Jahr 2018 gesunken ist [BVSE 2020]. Dies liegt an der sinkenden Qualität durch Treiber wie Fast Fashion. Es ist davon auszugehen, dass dieser Trend weiter anhält. [BVSE 2020] Darüber hinaus wurden Sammler auf dieses Thema sensibilisiert und das Anzeigeverfahren vereinfacht. [UBA 2022]

Sammlungen sind nach § 18 Abs. 1 bis 3 KrWG der zuständigen Behörde anzuzeigen und können unter bestimmten Voraussetzungen untersagt werden [§ 18 Abs. 5 KrWG]. In Container oder der Straßensammlung überlassene Altkleider gelten zunächst als Abfall [§ 3 Abs. 24 KrWG] [HNLU 2020]

Die getrennte Sammlung von Bekleidung sowie Haus und Heimtextilien ist vor allem geprägt durch die Vorbereitung zur Wiederverwendung. [UBA 2022] Dies liegt in erster Linie an dem ökonomischen Wert der gesammelten Alttextilien. Die qualitativ besten 10% für den Wiederverkauf in Europa machen 53,2% des ökonomischen Wertes aus [JRC 2021]. Darüber hinaus spielt die humanitäre Unterstützung durch gemeinnützige Organisationen bei der Alttextilsammlung eine große Rolle. [UBA 2022]

#### 4.3.1 Sammelmenge getrennt erfasster Textilien

##### Sammelmengen nach Auswertung der Abfallbilanzen der Länder

Eine Berichtspflicht der zuständigen Behörden für die getrennt erfassten Mengen Alttextilien gibt es bis jetzt nicht. Zwar werden die Sammelmengen in der Abfallbilanz des Hausmülls des jeweiligen Bundeslandes angegeben, jedoch mit dem Hinweis versehen, dass die Daten nicht vollständig sind. In Tabelle 4-7 sind die gesondert erfassten Alttextilien aus den neusten Abfallbilanzen der jeweiligen Bundesländer dargestellt.

In den Bundesländern Saarland und Niedersachsen werden keine Angaben gemacht. Bayern hat mit 56.388 t/a die höchste Menge; allerdings sind auch in Bayern die Daten mit folgendem Hinweis versehen:

*„Die Sammlung von Alttextilien wird in der Regel von gewerblichen oder karitativen Einrichtungen durchgeführt, weshalb die Daten bei dieser Fraktion meist nicht vollständig vorliegen. Es ist davon auszugehen, dass die tatsächlich angefallenen Werte höher sind als die durch die Körperschaften gemeldeten.“* [BayLfU 2020]

Tabelle 4-7: Gesondert erfasste Alttextilien der Bundesländer nach Abfallbilanzen

Quelle	Separat erfasste Alttextilien insgesamt [t/a]	spezifische Menge [kg/(Ew*a)]
Baden-Württemberg [2021]	3.258	-
Bayern [2020]	56.388	4,5
Berlin [2021]	766	0,2
Brandenburg [2020]	2.018	-
Bremen [2021]	1.451	1,5
Hamburg [2021]	5.920	3,3
Hessen [2020]	7.315	1,2
Mecklenburg-Vorpommern [2020]	764	0,5
Niedersachsen	-	-
Nordrhein-Westfalen [2019]	35.540	2,0
Reinland-Pfalz [2020]	2.839	
Saarland	-	-
Sachsen-Anhalt [2019]	510	0,2
Sachsen [2020]	31.893	8,0
Schleswig-Holstein [2020]	5.185	1,8
Thüringen [2020]	2.135	1,0

Die spezifischen Sammelmengen der Stadt Augsburg lagen in den Jahren 2019 bis 2021 zwischen 3,7 kg/(Ew\*a) und 3,75 kg/(Ew\*a), also etwas unter dem Durchschnittswert für Bayern. Aus dieser Gebietskörperschaft sind Zahlen zum Verlauf der Sammelmengen verfügbar. In Abbildung 4-5 erkennbar ist der für Abfallmengen zu Jahresbeginn typische Einbruch im Januar und während der Sommermonate. Auffällig ist, dass im Gegensatz zu den Restabfallmengen auch im Dezember die Sammelmenge gering ist. Mit Ausnahme des Dezembers 2019 blieben die Mengen aber innerhalb einer Spannweite von  $\pm 20\%$  der mittleren Monatsmenge, so dass die Schwankungen insgesamt als gering anzusehen sind. Das bedeutet, dass für die Versorgung einer zentralen Recycling- oder Vergasungsanlage mit den nicht höherwertig zu verwertenden Alttextilien keine besonderen Lagerkapazitäten zum Ausgleich von Schwankungen der Sammelmengen benötigt werden.

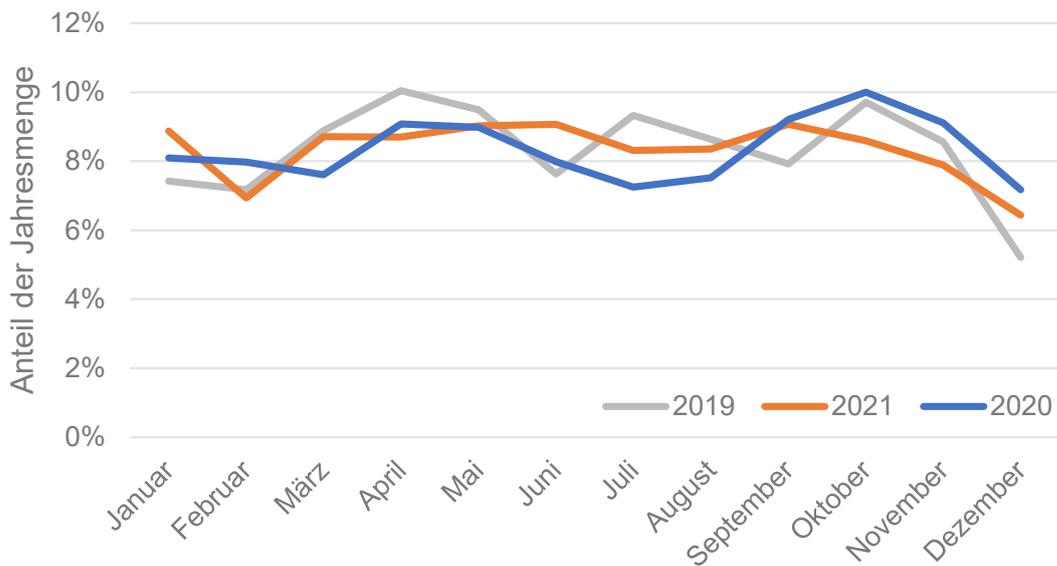


Abbildung 4-5: Verlauf der Alttextil-Sammelmengen in Augsburg als Anteil der Jahresmenge

### Andere Ansätze zur Ermittlung der Menge der separat anfallenden Alttextilien

Eine gesetzliche Berichtspflicht der zuständigen Behörden zu Alttextilien gibt es bis heute nicht. [UBA, 2022] Bis heute fehlt es an bundesweit statistisch erfassten Daten zu Alttextilien und die detaillierte Kenntnis von Mengen in Deutschland, deren Zusammensetzung und Verbleib. [UBA, 2022] Im Rahmen von zwei Studie wurden primär Daten zur getrennten Sammlung von Alttextilien für Deutschland erfasst (Tabelle 4-8).

Tabelle 4-8: Gesondert gesammelte Alttextilien im Jahr 2018

Quelle	Deutschland [t]	Deutschland [kg/(Ew*a)]
BVSE 2020	1.271.242	15,10
UBA 2022	1.000.000	12,01

Die Studie „Bedarf, Konsum und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland“ des Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. [BVSE] wurde im Jahr 2020 bereits zum dritten Mal durchgeführt und die Berechnungen basieren auf den Studien aus den Jahren 2008 und 2013. [BVSE, 2015] Im Rahmen der Studie wurde eine Befragung unter den Mitgliedsunternehmen des BVSE-Fachverbandes Textilrecycling durchgeführt. Die Befragung umfasste die Themenbereiche „Erfassung“, „Sortierung“ und „Verwertung/Vermarktung“ von Alttextilien für das Jahr 2018. [BVSE ,2020] Die Teilnehmenden wurden nicht nach der Menge der von ihnen gesammelten Alttextilien gefragt, sondern es wird davon ausgegangen, dass die getrennte Sammlung dem Verbrauch entspricht, abzüglich der im gemischten

Abfall entsorgten Textilien, abzüglich der in den Haushalten anfallenden Textilien und abzüglich des Flusenverlustes in der Wäsche. Die beiden letztgenannten Faktoren werden sehr grob geschätzt. Die in gemischten Abfällen entsorgten Textilien basieren auf nicht umfassenden Daten zur Abfallerfassung aus dem Jahr 2006. Die Schätzung für die getrennte Sammlung ist daher mit großer Vorsicht zu behandeln und sollte eher als Obergrenze für die potenzielle Sammlung denn als tatsächlich erreichte Sammlung betrachtet werden. [JRC, 2021]

Neben der BVSE-Studie wurden vom Umweltbundesamt 2022 im Rahmen der Studie „Evaluation der Erfassung und Verwertung ausgewählter Abfallströme zur Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft“ Primärdaten zum Textilabfall in Deutschland ermittelt. Zur Datensammlung wurden die für Anzeigeverfahren nach § 18 KrWG zuständigen Behörden der Bundesländer, im Gegensatz zum BVSE, zu ihren konkreten Sammelmengen befragt. [UBA, 2022] Die Rücklaufquote der befragten Behörden lag jedoch nur bei 29%. Hochgerechnet über alle Sammelakteure beläuft sich die Menge für das Jahr 2018 auf insgesamt 752.615 t [9,1 kg/EW]. Die Ermittlung der Sammelmengen basieren grundsätzlich auf einer Hochrechnung der Einwohnerzahlen des Gesamtgebietes der bewerteten Fragebögen im Verhältnis zu den Einwohnerzahlen der Gesamtbevölkerung. [UBA, 2022]

Im Rahmen dieser Studie kommen die Autoren zu dem Schluss, dass die vorliegenden Daten nicht für eine repräsentative Hochrechnung genügen, da die betrachteten einzelnen Mengemeldungen vergleichbarer Siedlungsstrukturen teilweise um +/- 36% abweichen [Zinkler et al., 2019]. Eine Clusterbildung erscheint deshalb nicht möglich. Des Weiteren liegen kaum Daten aller Sammelakteure für ein Gebiet insgesamt vor. In einigen Fragebögen wurde bemerkt, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Menge über alle gewerblichen und gemeinnützigen Sammler nicht vollständig angegeben ist, da der Auflage im Rahmen der Anzeige nach § 18 KrWG, jährlich die Mengen zu übermitteln, oftmals nicht gefolgt würde. Auch wenn die Rückmeldungen sowohl ländliche als auch [Groß-] städtische Daten umfassen, liegen diese Gebiete zum großen Teil in drei Bundesländern. [UBA, 2022] Aus diesem Grund wird die BVSE-Studie aus dem Jahr 2020 näher betrachtet und durch weitere Annahmen korrigiert. Dies wird im Folgenden beschrieben.

Im Rahmen der BVSE-Studie wird die Menge der gesondert erfassten Alttextilien über die Inlandsverfügbarkeit von Bekleidung, Haustextilien, Taschen/Lederwaren und Schuh abzüglich der im Restabfall entsorgten Textilien und abzüglich des Flusen-Verlustes in der Wäsche abgeschätzt.

Für die Inlandsverfügbarkeit von Textilien sind bislang keine vollständigen Statistiken, sondern nur unterschiedliche Daten, aus denen sie sich zusammensetzt, erhältlich. Im Rahmen der BVSE-Studie werden diese über drei verschiedene Berechnungsmethoden ermittelt.

(Grundmethode, Verbrauchsmethode und Konsummethode). Die drei verschiedenen Varianten werden verwendet, um eine ausreichende Plausibilitätsprüfung durchführen zu können. Die Inlandsverfügbarkeit und somit das potenzielle Sammelaufkommen, setzt sich dabei aus der Inlandsproduktion, dem Außenhandel sowie der illegalen Einfuhr zusammen. [BVSE, 2015] [BVSE 2020] Im Rahmen der UBA 2022 Studie werden diese Methoden noch einmal angepasst.

### Grundmethode

Bei der Grundmethode berechnet sich die Inlandsverfügbarkeit (INLV) aus der Inlandproduktion und dem Außenhandelsaldo (Differenz zwischen Import und Export). In der Studie des Umweltbundesamt wird im Vergleich zum BVSE die Tragedauer von 1 Jahr auf 3 Jahre korrigiert. Zusätzlich wird die Arbeitskleidung abgezogen, da diese in der Regel nicht über die Altkleidercontainer entsorgt werden und berücksichtigt die private Einfuhr gemäß der Konsummethode. (Tabelle 4-9) Dadurch kommt das Umweltbundesamt im Vergleich zum BVSE auf eine INLV von 1.577.094 t. [UBA, 2022; BVSE, 2020]

Tabelle 4-9: Angepasste Mengen der Grundmethode [UBA2022]

Parameter	Menge in t	Bemerkung
Inlandsverfügbarkeit [INLV] BVSE	1.634.731	
Berücksichtigung Tragedauer [3a]	-99.721	Inlandsverfügbarkeit 2015 = 1.535.010 t.
Abzug Menge Arbeitsbekleidung	-38.210	Anteil = 2,7%
Berücksichtigung privater Einfuhren gemäß Konsummethode	80.294	
Ergebnis angepasste Parameter	1.577.094	

### Konsummethode

Die Inlandsverfügbarkeit der Konsummethode ergibt sich durch die prozentuale Differenz zwischen den privaten Konsumausgaben für Bekleidung (KAG) und den Umsatz des Textilhandels zum Ergebnis der Inlandsproduktion und des Außenhandelsaldos hinzugerechnet (Tabelle 4-10). Die Differenz kann Rückschlüsse auf im Ausland gekauften und nach Deutschland eingeführten Produkte haben. Bei dieser Methode wird die prozentuale Differenz zwischen

besagten Konsumausgaben und dem Umsatz zu der Inlandsverfügbarkeit, welche mit der Grundmethode berechnet wurde, hinzugerechnet. [BVSE, 2015] [UBA, 2020]

Tabelle 4-10: Angepasste Mengen der Konsummethode [BVSE 2020 UBA 2020]

Parameter	Ansatz bvse [in t]
Inlandsverfügbarkeit [INLV] ohne private Einfuhren neu	1.375.560 t
Prozentuale Differenz	13,21%
<b>Ergebnis angepasste Parameter</b>	<b>1.557.271 t</b>

### Verbrauchsmethode

Bei der Verbrauchsmethode wird der Pro-Kopf-Verbrauch an Textilien ermittelt und mit der Einwohnerzahl multipliziert. Der BVSE geht von einem Verbrauch von durchschnittlich 60 Kleidungsstücken mit einem Durchschnittsgewicht von 300 g sowie 3,5 kg pro Einwohner für Haustextilien aus. Dies entspricht einem Pro-Kopf-Verbrauch von 21,5 kg. [BVSE, 2020]

Die Studie des Umweltbundesamtes schätzt diesen Verbrauch als etwas zu hoch ein. Im JRC-Report wird in der EU ein durchschnittlicher Verbrauch von 12,3 kg für Textilien in der EU angegeben [JRC, 2021]

Als Vergleich werden Zahlen aus Frankreich herangezogen, da Hersteller und Importeure die in Verkehr gebrachten Mengen an Bekleidung, Haustextilien und Schuhen melden müssen. Diese Verpflichtung ist Teil der gesetzlichen Vorgaben im Zusammenhang mit der Umsetzung der erweiterten Herstellerverantwortung für Textilien [EcoTLC agreement, 2020]. In Frankreich wird das Durchschnittsgewicht der Textilien mit 0,225 kg angegeben [UBA, 2022] Das Umweltbundesamt passt die Menge der Verbrauchsmethode durch eine Gewichtung des durchschnittlichen Gewichts eines Kleidungsstückes des BSVSE [40% 0,3 kg] und Frankreich [60% 0,255 kg] und kommt somit auf einen Wert von 0,254 kg pro Kleidungsstück.

Tabelle 4-11: Angepasste Mengen der Verbrauchsmethode [UBA, 2022]

Parameter	Gewicht pro Kleidungsstück
Referenzwert BVSE	0,3 kg
Gewicht pro Teil gemäß Mengenmeldung in Frankreich	0,224 kg
Gewichtung: BVSE 40% / französischer Wert 60%	0,254 kg
<b>Ergebnis angepasste Parameter</b>	<b>1.575.679 t</b>

In Abbildung 4-6 sind die Inlandsverfügbarkeiten nach Grund-, Konsum- und Verbrauchsmethode von BVSE und dem Umweltbundesamt dargestellt. Es ist zu sehen, dass das Umweltbundesamt bei allen drei Methoden auf eine geringere Inlandsverfügbarkeit kommt. Gleichzeitig sind die ermittelten Werte gleichmäßiger. Aus den oben beschriebenen Gründen wird in dieser Studie ebenfalls eine Inlandsverfügbarkeit von 1,56 Mio. t angenommen.

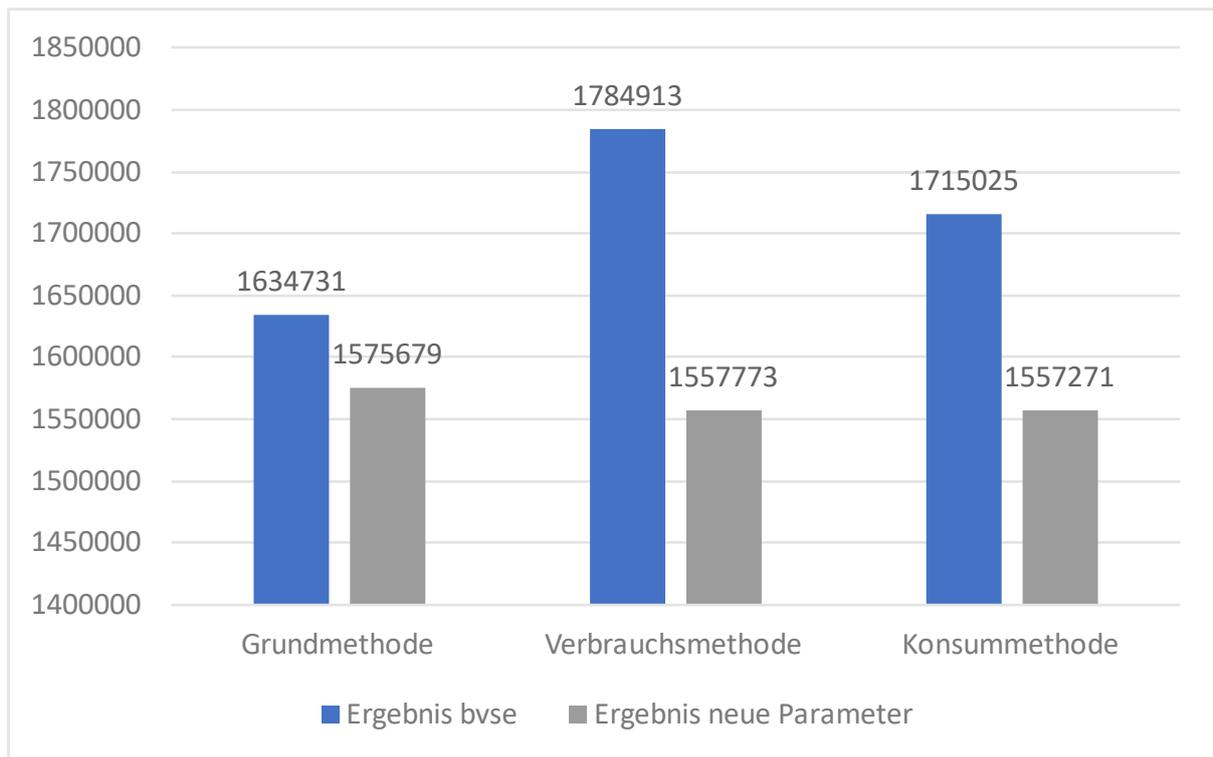


Abbildung 4-6: Übersicht Inlandsverfügbarkeit bvse und Ergebnis neue Parameter [UBA2022]

Ausgehend von der Inlandsverfügbarkeit, die das potenzielle Sammelaufkommen darstellt, wird das tatsächliche Sammelaufkommen berechnet. Der BVSE berechnet das tatsächliche Sammelaufkommen aus der Inlandsverfügbarkeit abzüglich der nicht getrennt erfassten Textilien, abzüglich des Verlustes beim Waschen sowie einer Reserve langer Zeit im Kleiderschrank verbleibender Kleidung. Diese Werte sind in der BVSE-Studie jedoch nur grobe Schätzungen und werden im Folgenden in Anlehnung an das Umweltbundesamt angepasst.

#### Menge nicht getrennt erfasster Alttextilien:

In Abschnitt 4.2.1 wurde die Menge der Textilien im Restabfall detailliert beschrieben. Der BVSE geht von einem veralteten Wert von 3,0 kg/(Ew\*a) aus. Dies wird als deutlich zu gering eingeschätzt. Das Umweltbundesamt verwendet die 2020 veröffentlichte Restabfallanalyse von Dornbusch et.al von 4,5 kg. Die Sortieranalysen des bifa Umweltinstituts zeigen, dass

teilweise auch deutlich höhere Mengen (3,8 bis 11,0 kg/(Ew\*a)) anfallen können. Es ist jedoch zu beachten, dass in diesen Restabfall-Sortieranalysen nicht nur die aus Haushalten stammenden Abfälle betrachtet wurden, sondern auch gewerbliche Abfälle („Geschäftsmüll“) und technische Textilien, die im Restabfall landen. Zudem ist die Feuchtigkeit des Materials mit bis über 20 % höher als bei separat erfassten Textilien. Dies erklärt die teilweise sehr hohen Werte. Aus diesem Grund wird für die Berechnung der tatsächlichen Menge Alttextilien im Restmüll die nur den Haushalten anfallenden Mengen betrachtet und wie beim Umweltbundesamt eine Menge von 4,5 kg/(Ew\*a) angenommen.

Tabelle 4-12: Vergleich tatsächliche Sammelmenge BVSE und Umweltbundesamt [BVSE 2020; UBA, 2022]

	Annahme BVSE	Annahme UBA	Differenz BVSE
Nicht getrennt erfasste Textilien	3,0 kg/(Ew*a)	4,5 kg/(Ew*a)	124.529 t
Masseverlust	2%	2%	-
Reserve nicht getragener Kleidungsstücke	5%	14%	147.126 t

### Masseverlust

Der BVSE nimmt einen Masseverlust bei Gebrauch und Waschen durch Faserabrieb und Mikroplastik von 2% an. Andere Erkenntnisse zu diesem Wert liegen nicht vor. Aus diesem Grund wird dieser Wert übernommen.

### Reserve nicht getragener Kleidungsstücke im Schrank

Der BVSE nimmt eine Reserve von 5% an. Das Umwelt Bundesamt kommt unter der Angabe, dass Deutsche im Durchschnitt 100 Kleidungsstücke besitzen von denen 40% nie bis selten getragen werden zu dem Schluss, dass diese Reserve zu gering ist. [UBA, 2022] Auf Bezug von [Bartlett et al., 2012] wird eine Reserve aus dem vereinigten Königreich von 14% angenommen. [UBA, 2022]

### Fazit Sammelmengen getrennt erfasste Alttextilien

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es in Deutschland an verlässlichen Daten zur getrennten Sammlung von Alttextilien fehlt. Die Sammelmenge liegt vermutlich zwischen 1 und 1,27 Mio. Tonnen im Jahr 2018. In Bayern entspricht dies einer Menge von 158.039 bis 198.636 t im Jahr 2018.

Es ist davon auszugehen, dass die Sammelmenge in den darauffolgenden Jahren weiter ansteigt [BVSE, 2020].

Tabelle 4-13: Gesondert gesammelte Alttextilien im Jahr 2018 [UBA 2022]

Quelle	Deutschland [t]	Deutschland [kg/(Ew*a)]	Bayern [t]*
BVSE 2020	1.271.242	15,1	197.508
UBA 2022	1.000.000	12,0	157.091

\* Bei einer Einwohnerzahl in Bayern von 13.08 Mio

#### 4.3.2 Sortierung getrennt erfasster Textilien

Von der Sammelstelle aus gelangen die Textilien in Sortieranlagen im In- oder Ausland. [Fashion for good, 2022] Bis heute findet die Sortierung manuell statt. Eine automatische Sortierung der gesammelten Alttextilien ist bis heute technisch noch nicht realisiert.

Ziel der Textilsortierung ist es, sicherzustellen, dass die Textilien sowohl aus ökologischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht bestmöglich genutzt werden [Fashion for good, 2022]. Manuelle Sortiervorgänge werden schrittweise durchgeführt und konzentrieren sich auf die Entfernung von nichttextilen Artikeln (wie Hausmüll und Schuhe), die Identifizierung der Textilien für die Wiederverwendung, sowie die Sortierung von Textilien für die stoffliche Verwertung. Insgesamt ist in Deutschland die jährliche Sortierkapazität mit ca. 200.000 t deutlich geringer als die in Deutschland getrennt gesammelte Menge von 1 Mio. t im Jahr. [Fashion for good, 2022]

Nicht sortierte gesammelte Alttextilien werden zur Sortierung ins europäische Ausland exportiert. Für Sortieranlagen in Ländern, in denen der Einkauf von gesammelten Textilien teurer ist, sind daher gesammelte Textilien aus Nachbarländern ein attraktives Ausgangsmaterial für ihre Tätigkeit. [Fashion for good, 2022]

Die Tiefe der Sortierung ist stark vom Sammler abhängig. Kleinere und vor allem karitative Sammler und Sortierer sortieren in erster Linie nur die noch tragbare Kleidung aus. Die restlichen textilen Abfälle werden kostenpflichtig entsorgt. Größere Sortierbetriebe hingegen sortieren die gesammelten Alttextilien in über 300 Kategorien: von der „cream Kategorie“ für die Wiederverwendung in Deutschland über verschiedene stoffliche Verwertungen bis hin zur thermischen Verwertung.

### 4.3.3 Weiterverwertung getrennt erfasster Textilien

Nach der Sortierung werden die jeweiligen Kategorien ihrer Weiterverwertung zugeführt. Abbildung 4-7 stellt die Verwertungswege der durch die BVSE ermittelten textilen Abfälle dar. 62% der Gesamtmenge (810.000 t) der Alttextilien werden wiederverwendet. Das heißt diese Alttextilien werden wieder als Bekleidung in Deutschland (ca. 10%) oder auf dem ausländischen Markt weiterverkauft. 14% der Alttextilien werden als Putzlappen weiterverwendet. Diese müssen hauptsächlich aus Baumwolle bestehen, um die benötigte Saugkraft zu erreichen. In die weitere Verwertung zum Recycling wie z. B. als Reißfasern kommen 12%. Die Weiterverwendung als Putzlappen und die Verwertung zu Reißfasern wird anders als in der BVSE-Studie im Folgenden als stoffliche Verwertung betrachtet. Die übrigen 8% werden thermisch verwertet oder 4% deponiert. [BVSE, 2020] Eine Deponierung von Alttextilien ist in Deutschland nicht zulässig. Eine Angabe wie hoch die Fremdstoffe in den Fraktionen für thermische Verwertung und Deponierung ist, wird vom BVSE nicht gemacht.

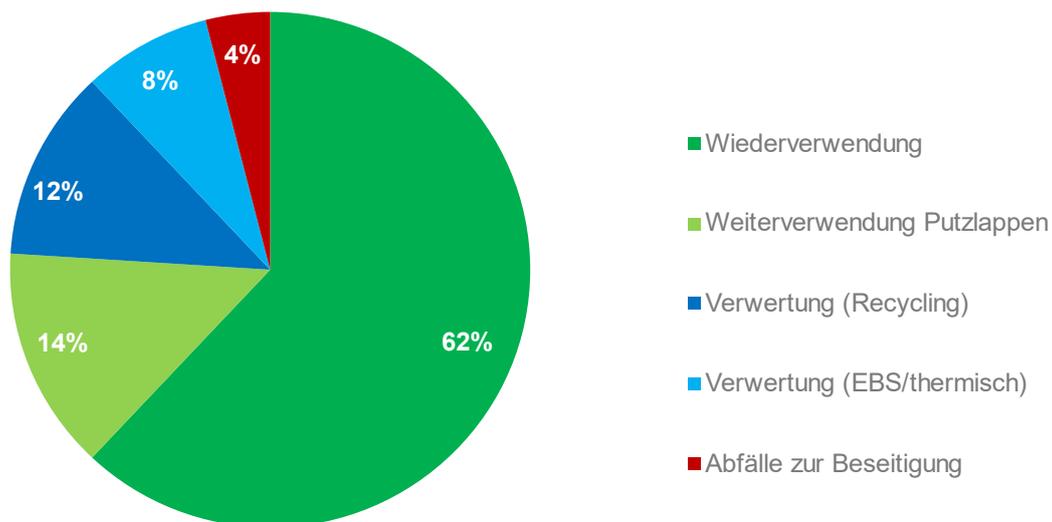


Abbildung 4-7: Verwertungswege von getrennt gesammelten Alttextilien [BVSE, 2020]

Neben dem BVSE wurde von der Innovationsplattform Fashion for good im Jahr 2022 eine Studie „Sorting for circularity: Europe - an Evolution and commercial assessment of textile waste across europe“ veröffentlicht. In dieser Studie wurden Stoffströme von getrennt gesammelten Alttextilien in Europa betrachtet. Für Deutschland nahmen an dieser Studie Texaid GmbH, I:Collect GmbH und SOEX Textil-Vermarktungsgesellschaft m.b.H. teil. [Fashion for good, 2022]

Laut Fashion for good wurden im Jahr 2019 in Europa 38% der Textilien auf dem Markt getrennt gesammelt. 55% der in den Fokus-Ländern der Studie gesammelten Alttextilien wurden wiederverwendet. 26% wurden stofflich verwertet. 8,1% des Sammelguts stellten Abfälle dar,

die thermisch verwertet wurden. Die restlichen 11% der gesammelten Menge waren Schuhe und wurden nicht weiter betrachtet. [Fashion for good 2022]

Werden die 11% Schuhe herausgerechnet, ergibt sich eine Wiederverwendungsquote von 61%, ein Anteil der stofflichen Verwertung von 29% und ein Anteil der thermischen Verwertung von 10%. Der Anteil der Deponierung entfällt bei Fashion for good. Es ist jedoch festzuhalten, dass an dieser Studie lediglich große Sortierbetriebe teilgenommen haben. Im Vergleich zu den vielen kleinen und karitativen Einrichtungen, haben große Sortierbetriebe deutlich mehr Möglichkeiten in verschiedene Kategorien zur stofflichen Verwertung zu sortieren. In kleinen Sortierbetrieben findet häufig keine Sortierung für die stoffliche Verwertung statt. Anstatt dessen werden alle nicht mehr tragbaren Textilien thermisch verwertet.

Aus diesen Gründen kann davon ausgegangen werden, dass mindestens 11,5% der getrennt erfassten Textilien sich weder für die Wiederverwendung noch für die stoffliche Verwertung eignen. Somit stehen in Deutschland 115.000 bis 144.000 t getrennt erfasster Alttextilien für die Wasserstofferzeugung zur Verfügung (Tabelle 4-14). Entsprechend der Einwohnerzahl (13,08 Mio.) entspricht dies 18.000 bis 23.000 t für Bayern.

Abbildung 4-8 stellt sortierte gepresste Ballen Alttextilien aus dem Altkleidercontainer dar, die für den Transport zur thermischen Verwertung vorbereitet wurden. Die Zusammensetzung der Alttextilien wird in Abschnitt 5 beschrieben.

Tabelle 4-14: Gesondert gesammelte Alttextilien im Jahr 2018

<b>Quelle</b>	<b>Deutschland [1.000 t]</b>	<b>Deutschland [kg/(Ew*a)]</b>	<b>Bayern [1.000 t]*</b>
Getrennt erfasste Alttextilie	1.000 bis 1.200	12,01 bis 15,01	158 bis 197
Wiederverwendung 61,5%	615 bis 768	7,34 bis 9,23	97 bis 121
Stoffliche Verwertung 27,0%	270 bis 337	3,24 bis 4,05	43 bis 53
Sonstige Verwertung 11,5%	115 bis 144	1,38 bis 1,73	18 bis 23



Abbildung 4-8: Textilien sortiert für die thermische Verwertung [Texaid]

Es ist davon auszugehen, dass sich die Sammelmenge und Qualität der getrennt gesammelten Alttextilien durch die 2018 überarbeitete EU-Abfallrahmenrichtlinie [2008/98/EG] stark verändern werden. In der EU-Abfallrichtlinie fordert die EU ab dem 1. Januar 2025 eine getrennte Erfassung von Alttextilien. Für Länder, wie Deutschland, mit gut etablierten Sammelsystemen besteht die Herausforderung in der zusätzlichen Sammlung von nicht mehr tragbaren Alttextilien, die aktuell im Restabfall landen. Diese Änderungen werden voraussichtlich zu einer höheren Sammelmenge führen, bei einer zugleich abnehmenden Qualität. Alttextilien aus dem Restabfall weisen eine extensive Nutzung und einen hohen Verschmutzungsgrad auf. Bei einer Verlagerung dieser Textilabfälle in die bestehenden Sammelsysteme ist davon auszugehen, dass die Menge an faktisch nur thermisch verwertbaren Alttextilien bei der getrennten Textilsammlung steigen wird. [Fashion for Good, 2022]

#### 4.4 Aufkommen textiler Bodenbeläge in Deutschland und Bayern

Da textile Bodenbeläge keinen eigenen Abfallschlüssel haben und über verschiedene Entsorgungswege [Sperrmüll, Restabfall, gemischte Bau- und Abbruch Abfälle, Rücknahmesysteme] entsorgt werden können, kann die gesamte Abfallmenge nur anhand der Produktionsmengen abgeschätzt werden. [UBA, 2022] In Anbetracht der Zusammensetzung und der Herkunft der Abfälle von textilen Bodenbelägen können diese gleichzeitig als Textil-, Siedlungs- und Bauabfälle betrachtet werden [CIEŚLAK et al, 2006].

In Deutschland wurden laut einer Studie des ECRA im Jahr 2016 rund 176.000 m<sup>2</sup> Teppich verkauft. Bei einem durchschnittlichen Flächengewicht von 2,1 kg/m<sup>2</sup> wurden davon 130.000 bis 140.000 t [46,5%] als textile Bodenbeläge verwendet und 72.000 t [21,4%] als Teppiche und Läufer und 110.060 t (32%) in verschiedenen Anwendungsbereichen, vor allem im Automobilsektor oder als Outdoor- und Indoor-Sportflächen (Abbildung 4-9). [ECRA, 2021]

Schätzungen der Deutschen Umwelthilfe gehen für das Jahr 2016 von 1,6 Mio. t alten Teppichen in der EU aus. Ungefähr 400.000 t (im Jahr 2000) entfallen davon auf Deutschland. [Deutsche Umwelthilfe, 2017]

In einer Studie zur „Sammlung und Verwertung von Altteppichen“ des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz aus dem Jahr 2001 wird sogar eine Menge von 450.000 t an Altteppichen geschätzt. Zusammen mit den in Deutschland anfallenden Produktionsabfällen von 32.000 t/a ergibt das 5,8 kg Altteppiche pro Einwohner [BayLfU, 2001]. Diesen Zahlen folgend kann die in Bayern anfallende Menge auf jährlich rund 76.000 t Altteppiche geschätzt werden.

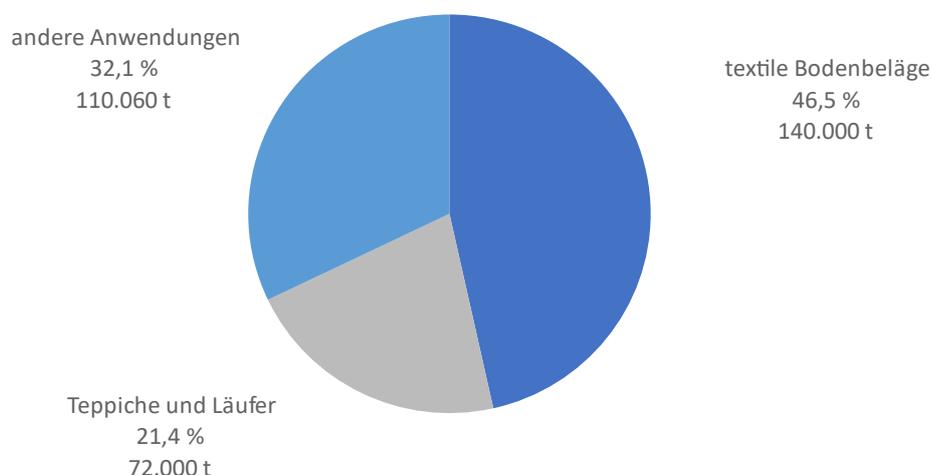


Abbildung 4-9: Verkaufsmengen von Teppichen in Deutschland im Jahr 2016 [ECRA 2021]

#### 4.4.1 Sammelmengen textiler Bodenbeläge im Sperrmüll

Im Sperrmüll werden textile Bodenbeläge sowie Teppiche und Läufer gesammelt. Teppiche in anderen Anwendungen wie dem Automobilsektor werden in der Regel nicht über den Sperrmüll entsorgt. Vor allem kleine Teppiche werden auch häufig über Altkleidercontainer oder den Hausmüll entsorgt. Die so entsorgten Teppiche wurden bereits bei diesen Stoffströmen berücksichtigt. Wie bei der getrennten Sammlung von Textilien ist auch beim Sperrmüll aus privaten Haushalten zwischen Hol- und Bringsystemen zu unterscheiden. Bei den Holsystem sind drei unterschiedliche Systeme zu berücksichtigen: Gebührenfreie Abholung auf Abruf, Gebührenpflichtige Abholung auf Abruf und periodische Sperrmüllsammmlung. Die Art der Sperrmüllsammmlung ist entscheidend für die anschließende Sortierung [DBU, 2017].

Teppiche liegen meist als „flächige“ Großteile vor und erschweren dadurch die Baggersortierung und anschließende händische oder maschinelle Sortierung des Sperrmülls. Deshalb werden sie ggf. getrennt erfasst. [DBU, 2017]

Das Umweltbundesamt gibt an, dass Teppiche und andere Bodenbeläge [Vinyl- Linoleum- oder PVC-Bodenbeläge] in Deutschland einen Gewichtsanteil von 8% im Sperrmüll ausmachen. Dies entspricht in Deutschland etwa 225.000 t und einem pro Kopf Aufkommen von 2,7 kg/a. [UBA, 2020] Bei einer Einwohnerzahl von 13,08 Millionen entspricht dies 35.000 t in Bayern.

#### 4.4.2 Verwertungsmöglichkeiten textiler Bodenbeläge

Nach dem Gebrauch werden in Deutschland Teppichböden überwiegend energetisch verwertet. In Deutschland ist die Deponierung von textilen Bodenbelägen untersagt, in der EU hingegen werden noch ca. 60 % deponiert [UBA, 2022; Deutsche Umwelthilfe 2017]. Der Anteil von wiederverwendbaren textilen Bodenbelägen im Sperrmüll liegt bei etwa 3 M-% [UBA, 2022]. Laut der Deutschen Umwelthilfe werden nur 3 % alter textiler Bodenbeläge stofflich verwertet [Deutsche Umwelthilfe, 2017].

Grund für die geringe Recyclingquote von Teppichen sind vor allem die fest miteinander verbunden Schichten aus verschiedenen Materialien. Teppichböden bestehen in der Regel aus drei verschiedenen Schichten. Der Nutzschicht [Teppichfasern oder Florschicht], der Mittelschicht und der Trägerschicht in Abhängigkeit des Herstellverfahrens, dem Einsatzzweck und Qualität werden für die Schichten verschiedene Materialien verwendet. [UBA, 2022] [ECRA 2021] Für eine stoffliche Verwertung müssten diese zunächst mit großem Aufwand voneinander getrennt werden. [UBA, 2022] Darüber hinaus sind Teppiche häufig aus Materialien mit niedriger Qualität und durch ihre lange Nutzungsdauer stark verschmutzt. Dies hat zur Folge, dass Teppiche aktuell auch für Downcycling-Produkte nur schwer stofflich zu verwerten sind.

Aus diesen Gründen stellen textile Bodenbeläge einen potenziellen textilen Stoffstrom für die Erzeugung von Wasserstoff dar. Insgesamt stehen in Deutschland allein 324.950 t aus der separaten Sammlung über den Sperrmüll zur Verfügung. Noch nicht betrachtet wurden textile Bodenbeläge aus anderen Anwendungen wie zum Beispiel dem Automobilsektor. Bei einem geeigneten Sammelsystem könnten auch diese der Wasserstoffherzeugung zu geführt werden.

#### 4.4.3 Zusammensetzung textiler Bodenbeläge

Die verschiedenen Materialien sind in Tabelle 4-15 für Nutz- und Mittelschicht sowie in Tabelle 4-16 für die Trägerschicht zusammengefasst. 33 M-% der eingesetzten Materialien entfallen auf Fasern der Nutzschiicht, 12 M-% auf Fasern der Mittelschicht und 55 M-% auf Materialien in der Trägerschicht. Aus dem Abfallaufkommen pro Einwohner im Sperrmüll von 2,7 kg/a\*EW und dem Anteil des verwendeten Materials ergeben sich die Mengen für Deutschland und Bayern, die für die Wasserstoffherzeugung bei einer Recyclingquote von 3% [changing Market Foundation 2018] [UBA, 2022] zur Verfügung stehen.

Tabelle 4-15: Zusammensetzung Fasermaterial Teppiche in Nutz und Mittelschicht (45% des Gesamtgewichts) [ECRA 2021]

	M-%	Deutschland [kg/(Ew*a)]	Deutschland [t]*	Bayern [t]
Polyamide/PA	40	0,47	39.241	6.166
PET	19	0,22	18.639	2.929
PP	23	0,27	22.564	3.546
Polyacrylnitril	5	0,06	4.905	771
Naturfasern	11	0,13	10791	1.696
Andere	2	0,02	1.962	308

Tabelle 4-16: Zusammensetzung Trägerschicht Teppiche 55% des Gesamtgewichts [ECRA2021]

	M-%	Deutschland [kg/(Ew*a)]	Deutschland [t]	Bayern [t]*
PP	7	0,10	8.393	1.319
PET	8	0,12	9.592	1.507
PU	<1	0,01	1.199	188
Latex/SBR	19	0,27	2.2782	3.580
PVC	2	0,03	2.398	377
Bitumen	5	0,07	5.995	942
Füller [Calciumcarbonat, CaCO <sub>3</sub> ]	35	0,50	41.966	6.594
Aluminiumhydroxid, [Al(OH) <sub>3</sub> ]	2	0,03	2.398	377
Glasfasern	<1	0,01	1.199	188
Andere	5	0,07	5.995	942

## 4.5 Zusammenfassung Textilabfallaufkommen in Bayern

Die in diesem Abschnitt ermittelten Werte für das textile Abfallaufkommen in Bayern sind in Abbildung 4-10 zusammengefasst. Insgesamt ist festzuhalten, dass es keine statistisch erfassten Daten zum textilen Abfallaufkommen in Bayern gibt. Die hier dargestellten Zahlen sind Hochrechnungen und Schätzungen und aus diesem Grund mit Vorsicht zu betrachten.

Für die Wasserstoffherzeugung stehen in Bayern 18.000 bis 23.000 t sortierte Alttextilien aus der getrennten Sammlung zur Verfügung, die aktuell thermisch verwertet werden. Die Zusammensetzung dieses Stoffstroms wird in der Sortieranalyse (Abschnitt 5) untersucht. Darüber hinaus fallen 60.000 bis 70.000 t Alttextilien im Restabfall an. Es ist davon auszugehen, dass auf Grund starker Abnutzung und Verschmutzung dieser Abfallstrom nicht für die Wiederverwendung oder eine stoffliche Verwertung geeignet ist und bei separater Erfassung größtenteils für die Wasserstoffherzeugung zur Verfügung stehen kann. Es wird für die weitere Betrachtung angenommen, dass dies in etwa 50.000 t im Jahr sind.

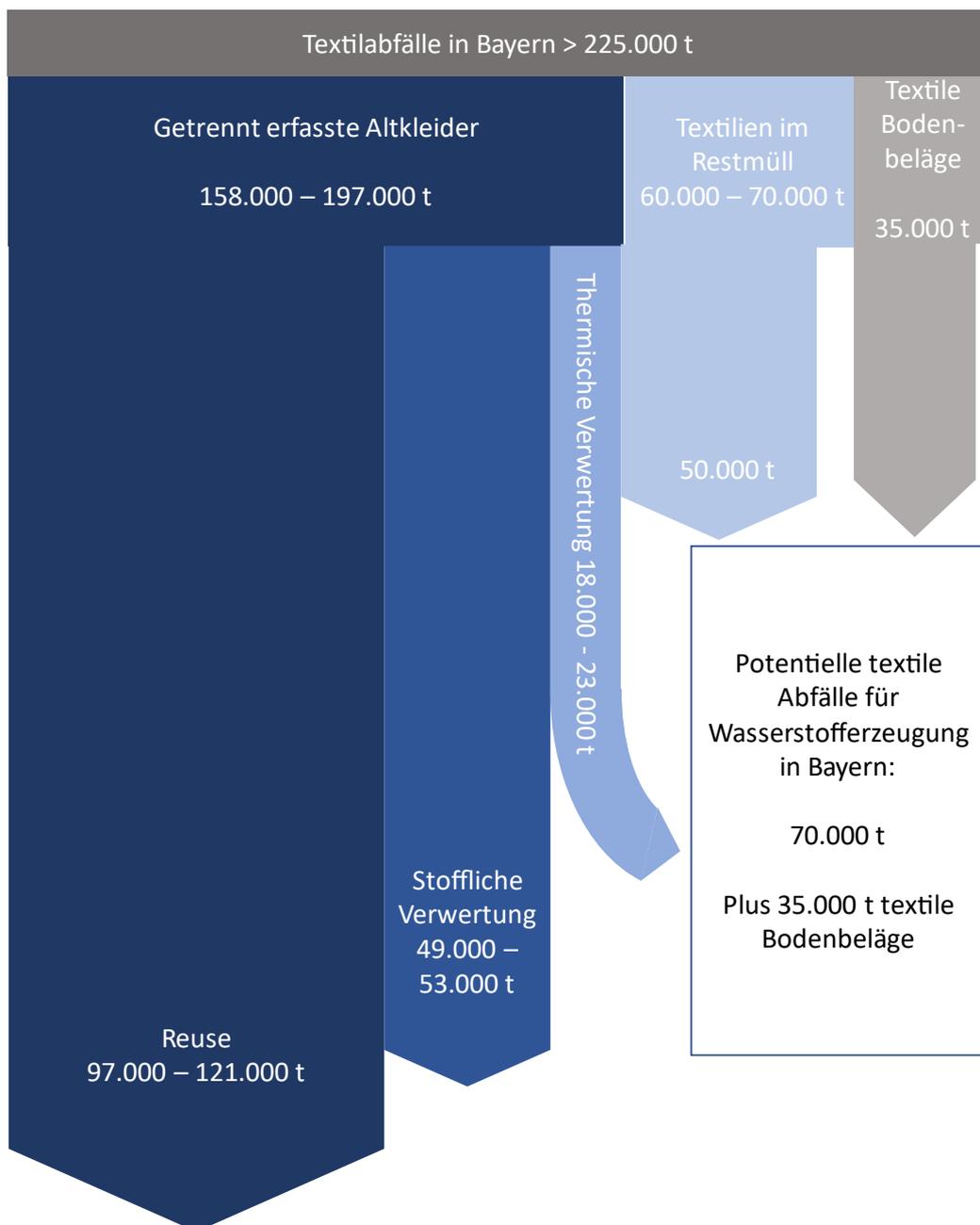


Abbildung 4-10: Textile Abfallströme in Bayern

Durch die geänderte EU-Abfall Richtlinie müssen diese Textilien ab dem 1. Januar 2025 getrennt erfasst werden. „Vor diesem Hintergrund wird die Kommission im Rahmen der bevorstehenden Überarbeitung der Abfallrahmenrichtlinie im Jahr 2023 EU-weit harmonisierte Vorschriften für die erweiterte Herstellerverantwortung für Textilien mit umweltbezogener Gebührenstaffelung vorschlagen. Hauptziel wird dabei die Schaffung eines Wirtschaftssystems für die Sammlung, Sortierung, Wiederverwendung, Vorbereitung zur Wiederverwendung und zum Recycling sowie von Anreizen für Hersteller und Marken sein, damit deren Produkte in ihrer Gestaltung den Grundsätzen des Kreislaufprinzips entsprechen.“ [EU 2022]. Neben

Bekleidung gilt dies auch für Heimtextilien und technische Textilien wie Produkte für medizinische Ausrüstung, Schutzausrüstung, Gebäude und Fahrzeuge. [EU 2022]

Darüber hinaus wurden die textilen Bodenbeläge aus dem Bereich der Heimtextilien auf Grund der großen Menge und schwierigen stofflichen Verwertung als interessanter Stoffstrom für die Wasserstoffherzeugung ausgemacht. In Bayern werden aktuell etwa 34.000 t/a Bodenbeläge aus der Sperrmüllfassung thermisch verwertet. Noch nicht betrachtet wurden hierbei textile Bodenbeläge aus anderen Anwendungsgebieten wie beispielsweise der Automobilindustrie. Durch geeignete Sammelsysteme besteht hier weiteres Potential für die Wasserstoffherzeugung.

Um die textile Kreislaufwirtschaft zu fördern, ist es unbedingt notwendig die Beschaffenheit und Mengen textiler Abfälle zu erfassen. Nur durch eine detaillierte Kenntnis über den zur Verfügung stehenden Sekundärrohstoff ist die Entwicklung von Textilrecycling, Handlungsempfehlungen und neuen Geschäftsmodellen möglich. Für die Weiterverwendung von Textilien im Sinne der Abfallhierarchie mit einer Vermeidung der Beseitigung von Textilien ist eine verbesserte Sortierung notwendig. Dies gilt sowohl für die Wiederverwendung als auch für werkstoffliche und Rohstoffliche Recyclingverfahren. Die Sortierung von Bekleidung wurde in Kapitel 4.3.2 beschrieben. Die manuelle Sortierkapazität in Deutschland liegt laut Fashion for good bei 200.000 t im Jahr. Vor dem Hintergrund der getrennten Sammlung von Textilien ab dem 1. Januar 2025 muss die Sortierkapazität in Deutschland ausgebaut werden, um eine möglichst hochwertige Weiterverwendung der Textilien gewährleisten zu können. Ein besonderes Augenmerk verdient die Tatsache, dass aktuell die Sortierung nur manuell durchgeführt wird. Sowohl qualitativ als auch ökonomisch bedarf es in diesem Segment starken Veränderungen und der Applikation neuer Technologien. Da die Sortierung in immer preiswerteren Märkten ökologisch keine Perspektive für die neue EU-Textilstrategie bieten kann, liegt die einzige Chance für eine sinnvolle Alternative in einer Entwicklung neuer, auf objektiven Messprinzipien aufgebauten und automatisierten Sortierung der Alttextilien orientiert an den zukünftigen Recyclingprinzipien.

Es sei angemerkt, dass sich die zusätzlichen Möglichkeiten, die hier am Beispiel der textilen Bodenbeläge aufgezeigt wurden, auch auf andere Produktgruppen im textilen Abfall erweitern lassen, weshalb eine analoge Annahme auch für die Produktgruppe der Matratzen angenommen werden kann. Eine Erweiterung durch weitere Produktgruppen ist insbesondere auf Basis einer angenommenen Erweiterung differenzierter Sammlungs- und Trennsysteme wahrscheinlich.

## 5 Zusammensetzung und Brennstoffeigenschaften von Textilabfällen aus der gewerblichen Altkleidersammlung

### 5.1 Analyse des Untersuchungsgebietes Augsburg

Zur Ermittlung statistisch abgesicherter Informationen zur Textilabfallzusammensetzung und der Eigenschaften der Abfälle wurde eine Sortieranalyse durchgeführt.

Als Untersuchungsgebiet wurde die Stadt Augsburg als repräsentative bayerische Stadt ausgewählt. Mit knapp 300.000 Einwohner ist Augsburg die drittgrößte Stadt in Bayern und verfügt über eine breite Siedlungsstruktur in seinen 42 Bezirken (Abbildung 5-1).

Zwei Betriebe für das Sammeln, Sortieren und Verwerten von gebrauchten Textilien, die in der Stadt Augsburg tätig sind, wurden kontaktiert und einbezogen. Es handelte sich um kommerzielles Unternehmen – Betrieb 1 genannt – und eine karitative Einrichtung – Betrieb 2 genannt. Die Betriebe stellten die notwendigen Alttextil-Proben aus ihren Sammelsystemen im Augsburger Stadtgebiet zur Verfügung. Zu diesem Zweck wurden die Proben gesondert erfasst und in den betriebseigenen Sortieranlagen vorsortiert.

Für die Beprobung wurde die Bevölkerungsdichte (Einwohner pro Hektar bewohnter Fläche) der Stadtbezirke kategoriell berücksichtigt<sup>2</sup>. Hierbei ergab sich folgende prozentuale Verteilung: großstädtisch dicht (18,1%), großstädtisch (64,5%), städtisch (14,7%) und ländlich dicht (2,7%). Die für die Beprobung ausgewählten Container des Betriebes 2 orientierten sich an der genannten Verteilung. Bei Betrieb 1 erfolgte die Sammlung der Alttextilien räumlich gleichverteilt über das gesamte Stadtgebiet ohne Berücksichtigung der Bevölkerungsdichteverteilung.

---

<sup>2</sup> Zuordnung der Siedlungsstrukturen erfolgte durch bifa auf Basis von LfU Daten wie folgt:  
Ländlich <125 Ew/km<sup>2</sup>; Ländlich dicht 125 bis 500 Ew/km<sup>2</sup>; Städtisch > 500 bis 1.750 Ew/km<sup>2</sup>; Großstädtisch < 1.750 Ew/km<sup>2</sup>, großstädtisch dicht > 1.750 Ew/km<sup>2</sup>

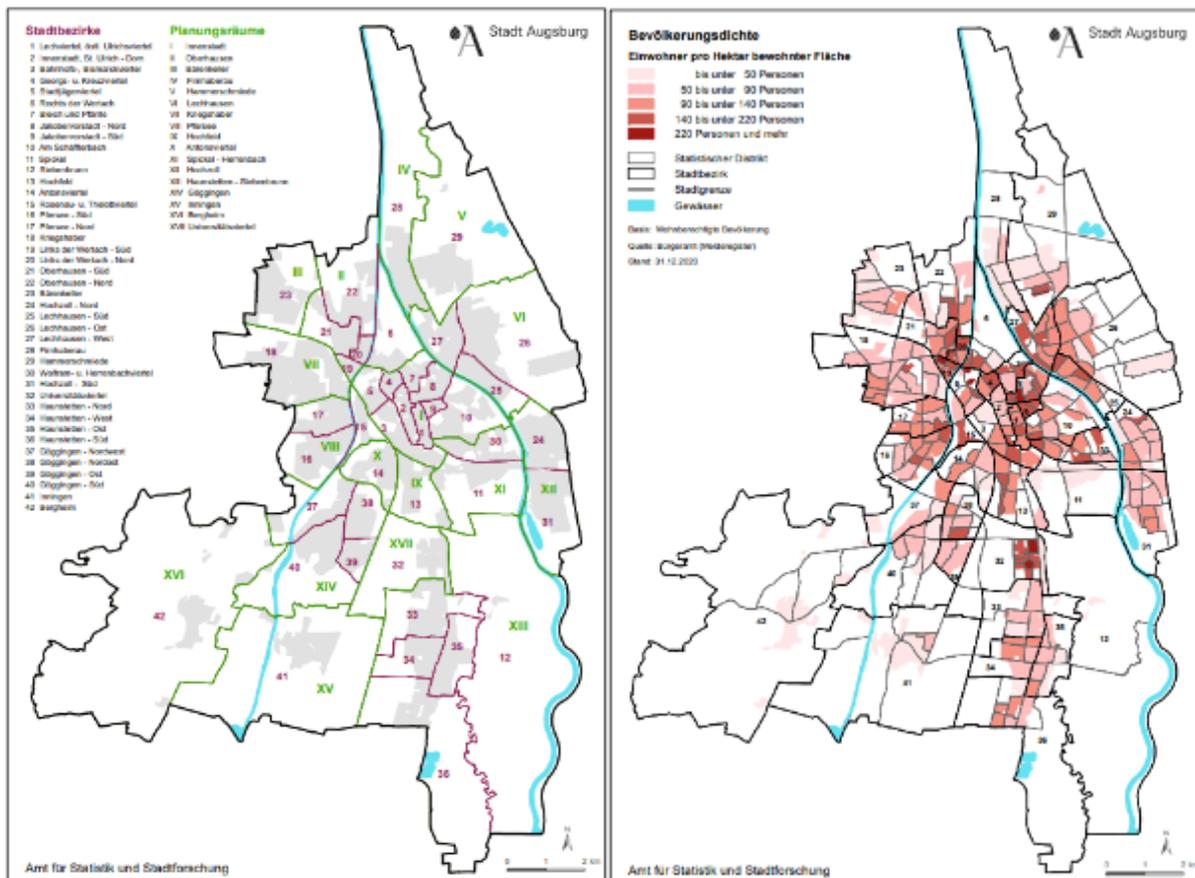


Abbildung 5-1: Übersichtskarte der Augsburger Stadtbezirke und Planungsräume (links) sowie Wohnberechtigte Bevölkerung pro Hektar bewohnter Fläche (rechts). Strukturatlas der Stadt Augsburg 2021.

## 5.2 Vorgehensweise bei der Probenahme und Sortieranalyse

Abbildung 5-2 zeigt die Anzahl sowie Verteilung der Containerstandorte für das Sammeln von Altkleidern im Augsburger Stadtgebiet. Betrieb 1 verfügt in Augsburg über 190 Sammelcontainer, Betrieb 2 über 120 Sammelcontainer. Die Container der beiden Betriebe sind im Stadtgebiet gleichmäßig verteilt.

Ziel der Probenahme war es, von jedem der beiden Betriebe jeweils eine Sammelprobe mit einem Volumen von mindestens 6 m<sup>3</sup> zu gewinnen. Dafür wurden von den Betrieben Probenahmekampagnen durchgeführt, für Betrieb 1 folgend Probe 1 genannt, für Betrieb 2 Probe 2.

In den Proben waren nach betrieblicher Sortierung ausschließlich sonstige Textilien enthalten, wie Putzlappen und Recyclingstoffe (sekundäre Textilrohstoffe) sowie Abfall zur Beseitigung (Restabfall, Textilmüll). Nicht enthalten waren Bekleidungstextilien in Premiumqualität (Cremequalität) sowie Secondhand- und Exportbekleidung.

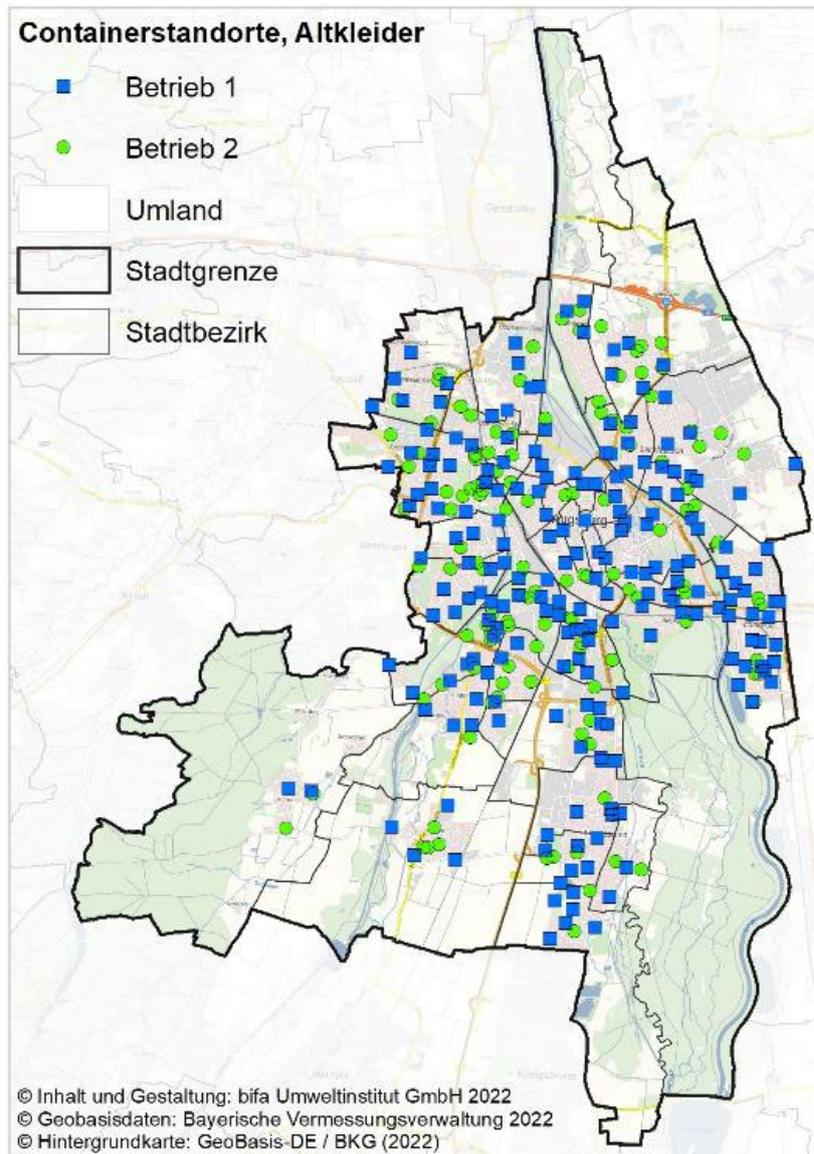


Abbildung 5-2: Standorte der Altkleider-Sammelcontainer in Augsburg

### Probenahme 1

Die erste Textilsammlung erfolgte durch Betrieb 1 im Juni 2022. In der eigenen Sortieranlage des Betriebs 1 wurde aus der gesammelten Textilmenge von 9 Tonnen Material die Cremequalität (ca. 6% der Probe) und Exportbekleidung (ca. 58% der Probe) zur weiteren Verwendung heraussortiert. Es handelte sich dabei um ein Standard-Vorgehen des Betriebs für jeglichen Alttextilinput. Sobald eine Probe von 800 kg erzeugt wurde, wurden diese Materialien separiert und in zwei Fraktionen weitersortiert (Probe 1 für bifa). Die dritte, bei dem Betrieb 1 anfallende Fraktion „Residualstoffe“ (Reststoffe) (<10% der Gesamtmenge) wurden von bifa zwar nicht untersucht, aber der Anteil wurde hochgerechnet und in die Ergebnisse eingeflossen.

Probe 1 besteht somit aus zwei Fraktionen:

- **„Putzlappen“:** Die Fraktion Putzlappen entspricht nach Betreiberangaben ca. 10% der zur Sortierung beim Betrieb 1 angelieferten Sammelmenge. Die Fraktion Putzlappen wird nach der Sortierung direkt an die Industrie vertrieben.
- **„Rohstoffe“:** Die Fraktion Rohstoffe macht ca. 16% der angelieferten Sammelmenge aus. Diese Fraktion wird an verschiedene spezialisierte Aufbereitungsunternehmen geliefert, die diese zu neuen Produkten verarbeiten (u.a. Dachpappe, Vliesstoffe)

## Probenahme 2

Die zweite Textilsammlung erfolgte im Juli 2022 durch den Betrieb 2 (Probe 2). Die Probenahme erfolgte unter der proportionalen Berücksichtigung der Siedlungsstruktur. Insgesamt wurden bei Betrieb 2 ca. 1 T Textilien sortiert. bifa hat 48,5% der aussortierten Ware für die Analyse erhalten. Weitere Fraktionen (51,5%), wie Cremeware (Vermarktung durch Secondhand) und Hilfsware (Vermarktung als Hilfsgüter) waren in der sortierten Probe 2 nicht enthalten.

Die Probe besteht nach betrieblicher Sortierung aus den folgenden Fraktionen:

- **„Rohstoffe“:** Die Fraktion Rohstoffe entspricht 15,5% der Sammelmenge. Die Rohstoffe unterteilen sich in weitere Fraktionen wie Kattun, Trikot, weiße Ware, Bettfedern, Frottee und werden vom Betrieb 2 üblicherweise vermarktet.
- **„Textilmüll“:** Bei der Fraktion Textilmüll, mit 19% von der Sammelmenge, handelt es sich um unverwertbare Textilien, die in thermischen Abfallanlagen entsorgt werden.
- **„Restabfall“:** Die Fraktion Restabfall (14% der Sammelmenge) entstammt den Container-Fehlwürfen und wird thermisch entsorgt.

Bei der Probe 1 war somit im Unterschied zu Probe 2 die Fraktion Residualstoffe (Reststoffe) nicht Teil der analysierten Probe, der Anteil wurde aber anhand von Betriebsangaben zugerechnet. Vom Betrieb 2 erhielt bifa direkt 1 t der Originalsammelware aus den Containern im Stadtgebiet. Somit war es möglich, die Zusammensetzung des Textilmülls sowie des Restabfalls zu betrachten.

Zur Sortierung der Alttextil-Proben 1 und 2 wurde jedes Textilstück manuell untersucht. Die Materialzusammensetzung wurde anhand der Etikettenbeschreibung ermittelt. Bei fehlenden oder unleserlichen Etiketten wurde die Materialzusammensetzung der Kleidungsstücke und Textilien mit Hilfe von Nahinfrarotspektroskopie (NIR) festgestellt (Abbildung 5-3, Abbildung 5-4). Hierzu wurden die Textilien von Hand einzeln auf das Transportband gegeben und in der Detektionskammer die stoffliche Zusammensetzung der Fasermaterialien bestimmt. Die

Erkennung mittels NIR oder nach Etikettenangabe gelang bei den Materialmischungen BW-PES (Baumwolle-Polyester), PA-BW (Polyamid-Baumwolle) sowie den mit PVC (Polyvinylchlorid) und PUR (Polyurethan) beschichteten Textilien. Textile Materialien, die nicht eindeutig einer bestimmten Faserfraktion oder Fasermischung zugeordnet werden konnten, wurden als sonstiges Mischgewebe erfasst. Dies gilt für alle Textilien, die aus mehreren Fasertypen bestehen und deren Zusammensetzung nicht detektiert werden konnte. Neben den PVC-Beschichtungen wurden keine weiteren halogenorganischen Stoffe erfasst.

Die Sortierfraktionen wurden anschließend ausgewogen. Enthaltener Restabfall, Textilmüll, Papier und Metalle wurden separat erfasst. In Tabelle 5-1 ist der Sortierkatalog dargestellt.



Abbildung 5-3: Zuführtransportband, Detektionseinheit und Monitor der NIR-Anlage



Abbildung 5-4: Sortierstation, NIR-Anlage und Materialfraktionen

Tabelle 5-1: Sortierkatalog

Hauptgruppe	Untergruppe bzw. Details
Baumwolle	BW (+Leinen, Viskose)
Baumwolle-Polyester (BW-PES)	BW-PES, bis 20% PES
	BW-PES, bis 40% PES
	BW-PES, bis 60% PES
	BW-PES, bis 80% PES
	BW-PES, über 80% PES
Polyester (100%)	PES
Polyamid (PA)	Nylon
Polyamid-Baumwolle (PA-BW)	PA-BW (alle Anteile PA)
Leder, Pelz, Wolle	Leder, Pelz, Wolle
Wolle-Mischgewebe	Mischgewebe
Polyacryl (PAN)	Polyacryl
Polyvinylchlorid (PVC) beschichtet	PVC und PVC beschichtet
Polyurethan (PUR) beschichtet	Kunstleder
Mischgewebe, sonstige	Einschl. Textilmischungen/Verbunde
Taschen	Taschen, Koffer, Rucksäcke
Schuhe	Schuhe
Sonstige Accessoires	Gürtel
Baumwolle	Jeans
Baumwolle	Bettwäsche, Handtücher
Baumwolle mit 5% Elasthan	5% Elasthan (bis 10%)
Baumwolle bis 80% PA	80% PA
Baumwolle-PES	
Frottee	
Polyester-Polypropylen (PES-PP)	PES-PP
Bettfedern	
Müll	Papier
Müll	Kunststoff
Müll	Restabfall

### 5.3 Auswertung

Die Abbildung 5-5 zeigt die Ergebnisse der Sortieranalyse der beiden Proben zusammengefasst in Hauptgruppen. Bei den Proben 1 und 2 liegen die Baumwolle-Anteile bei 46,6% und 53,5%. An zweiter Stelle steht PES mit 19,6% bei der Probe 1 und 21,5% bei der Probe 2. Weitere Fraktionen sind PA+PA/BW mit 3,2% bei der Probe 1 und 2,1% bei der Probe 2. Die Höhe der proteinbasierten Fraktion beläuft sich bei der Probe 1 bei 6,2% und bei der Probe 2 bei 2,6%. PAN trägt bei Fraktion 1 zu 1,8% und bei Fraktion 2 zu 1,3% bei. Die Höhe der Fraktion Mischgewebe beläuft sich bei Probe 1 bei 7,2% und bei der Probe 2 bei 3,7%. Für die Probe 1 liegt die Höhe der Reststoffe bei 15,4% und bei der Probe 2 bei 3,7%. Eine differenzierte Darstellung der Materialfraktionen findet sich in Abbildung 5-6.

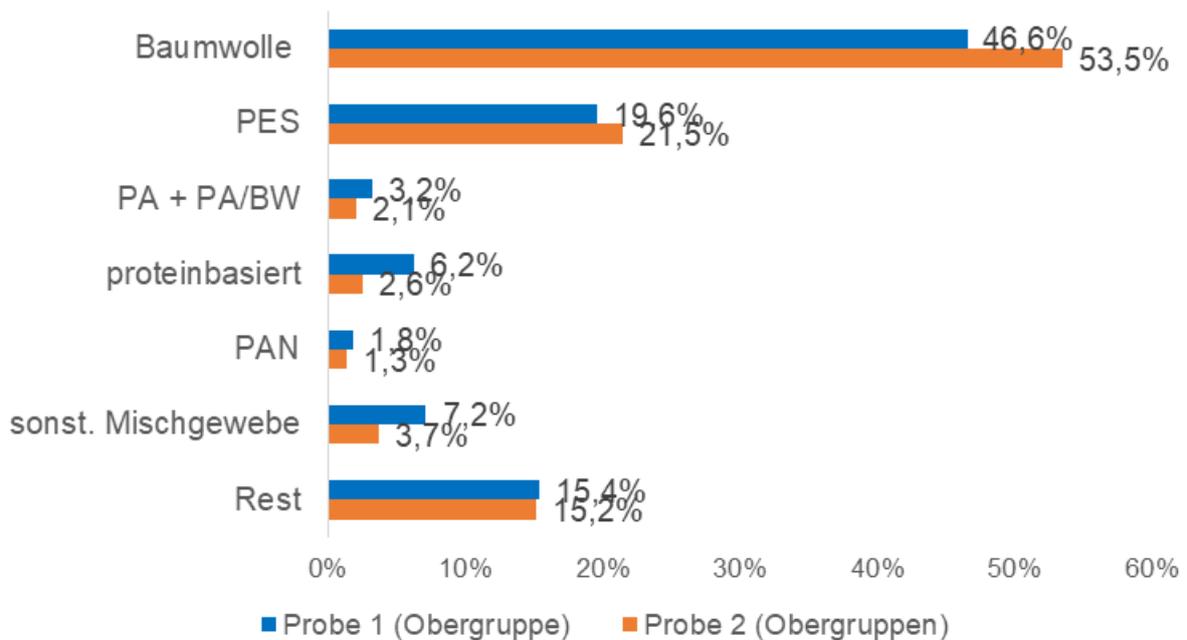


Abbildung 5-5: Ergebnis der Sortieranalyse (Sortierfraktionen in Hauptgruppen zusammengefasst)

Die Höhe der prozentuellen Anteile der jeweiligen Sortierfraktionen unterscheiden sich hauptsächlich in den Fraktionen Leder, Pelz, Wolle, Federn mit 4,5%-gem. Anteil bei der Probe 1 und 1,7%-gem. Anteil bei der Probe 2. Fraktion PVC-beschichtet wurde ausschließlich in der Ware des Betriebs 1 festgestellt. Die Fraktion PUR-beschichtet beläuft sich bei der Probe 1 bei 2,1% und bei der Probe 2 bei 0,3%. Fraktion Taschen wurde bei der Probe 1 sehr stark, und zwar bei 6,4%. Dafür bei der Probe 2 nur bei 1,1%. Sonstige Accessoires liegen bei der Probe 1 unter 0,01% und bei der Probe 2 bei 0,1%. Bei der Fraktion Restabfall liegen die Anteile bei der Probe 1 bei 8,9% und bei der Probe 2 bei 9,7%.

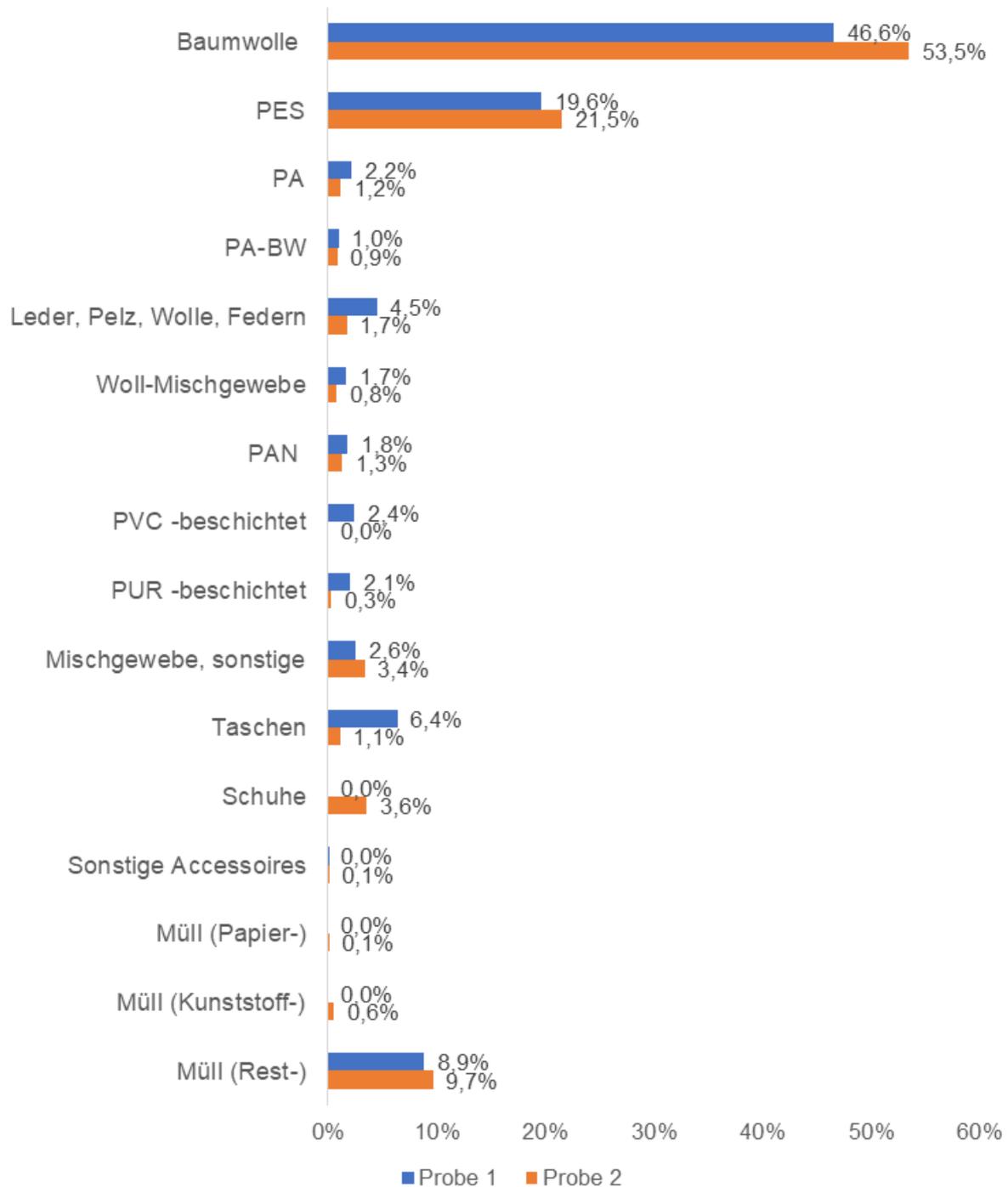


Abbildung 5-6: Detailliertes Ergebnis der Sortieranalyse für Probe 1 und Probe 2

Abbildung 5-7 gibt die über beide Proben gemittelten Sortierergebnisse nach den Materialhauptgruppen wieder. Der Anteil der Fraktion Baumwolle (BW) ist mit 50% höchsten. Polyester bildet mit 20,6% zweithöchsten Anteil. Die weiteren Bestandteile verteilen sich auf mehrere kleineren Fraktionen wie PA+PA/BW bei 2,6%, proteinbasiert bei 4,4%, Mischgewebe bei 5,4%, PAN bei 1,6% sowie sonstige und Rest bei 15,3%.

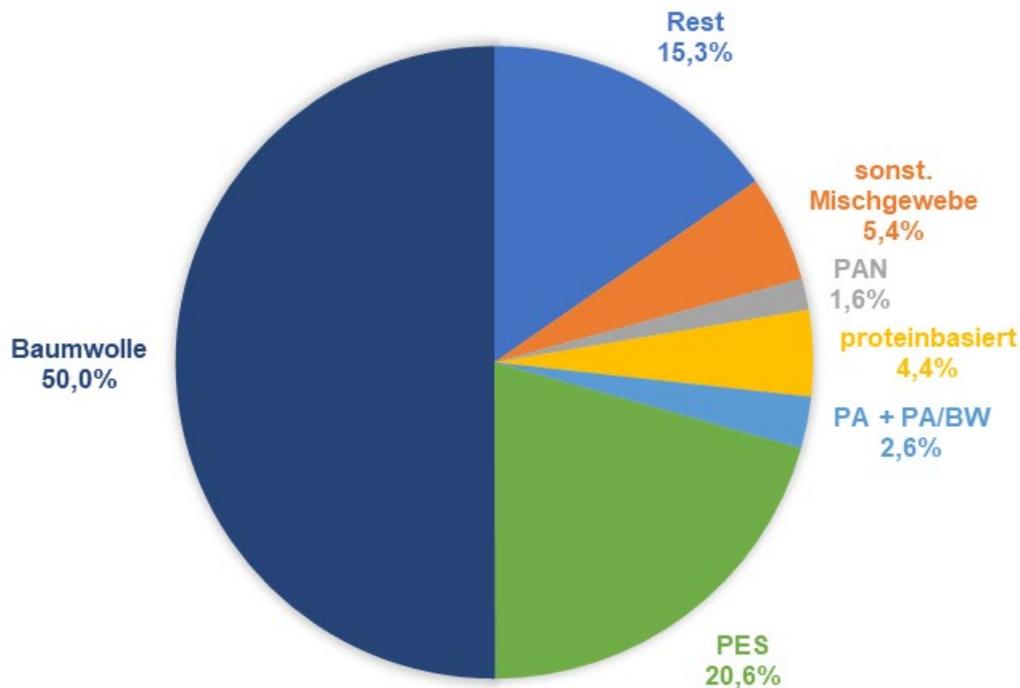


Abbildung 5-7: Sortierergebnis als arithmetische Mittelwerte über beide Proben

## 5.4 Brennstoffeigenschaften des Textilabfalls

Eine Mischprobe der Textilabfälle wurde untersucht. Tabelle 5-2 zeigt die wichtigsten Brennstoffeigenschaften der Probe. Der Wassergehalt der Textilabfälle ist mit 1,43 M-% sehr gering. Der Anteil an flüchtigen Bestandteilen (82,66 M-%) und der Glühverlust (98,4 M-%) sind verglichen mit anderen Brennstoffen sehr hoch, was wiederum zu einem geringen Aschegehalt führt (1,6 M-% bei 815°C). Damit fallen bei der Vergasung von 70.000 t/a Textilabfällen ca. 1.100 t/a an zu entsorgender Asche aus den Textilabfällen an. Die Müllverbrennungsanlage Augsburg hat einen vergleichsweise höheren Durchsatz von 355.300 t/a, wobei jährlich 53.800 t Schlacke pro Jahr erzeugt werden.

Es ist jedoch zu beachten, dass bei der Vergasung in der Asche Prozessstoffe, wie z. B. das Bettmaterial bei der Wirbelschichtvergasung enthalten sein können, wodurch die tatsächlich zu entsorgenden Mengen größer ausfallen könnte. Der Schwefelgehalt (0,13 M-%) und der Chlorgehalt (0,28 M-%) sind als gering einzustufen, weshalb mit wenig Halogenkorrosion in der Anlagenperipherie zu rechnen ist, was den Prozess wartungsarm macht. Die Fließtemperatur der Asche liegt mit 1.390°C im mittleren Bereich von Brennstoffen. Die Fließtemperatur ist wichtig für die Auslegung und den Betrieb von Vergasungssystemen. Der Betrieb sollte unterhalb dieser Temperatur stattfinden, wenn das Schmelzen und Sintern der Asche

verhindert werden soll. Der Betrieb sollte oberhalb dieser Temperatur stattfinden, wenn eine Verschlackung der Asche erwünscht ist.

Tabelle 5-2: Brennstoffeigenschaften des Textilgemisches

Parameter		Einheit
Wassergehalt	1,43	M-% (OS)
Asche 550°C	1,63	M-% (OS)
Asche 815°C	1,58	M-% (OS)
Flüchtige Bestandteile	82,66	M-% (OS)
Kohlenstoff fix	14,3	M-% (OS)
Glühverlust (550°C)	98,4	M-% (OS)
Kohlenstoff	48,7	M-% (OS)
Wasserstoff (gesamt)	5,93	M-% (OS)
Stickstoff (gesamt)	2,42	M-% (OS)
Sauerstoff (org.-geb.)	39,93	M-% (OS)
Schwefel	0,13	M-% (OS)
Chlor	0,28	M-% (OS)
Brennwert	19,5	MJ/kg (OS)
Heizwert	19,8	MJ/kg (OS)
Sintertemperatur	1.090	°C (Asche)
Erweichungstemperatur	1.225	°C (Asche)
Sphärischtemperatur	1.290	°C (Asche)
Halbkugeltemperatur	1.350	°C (Asche)
Fließtemperatur	1.390	°C (Asche)

Tabelle 5-3 zeigt die wichtigsten Elementgehalte der Asche. Nicht aufgelistete Aschebestandteile in der Asche lagen unterhalb der Nachweisgrenze. In der Asche wurden nach einem HF-HNO<sub>3</sub>-HCl-Aufschluss ein vergleichsweise hoher Calciumanteil in Höhe von 15,2 M-% nachgewiesen. Calcium kommt natürlicherweise in Baumwolle vor.

In der Probe wurden 490 mg/kg (TS) Antimon nach einem Königswasserdruckaufschluss nachgewiesen. Antimon findet man meist in Polyester, da er bei der Herstellung als Katalysator eingesetzt wird. Auch die Flammschutzmittel können Antimon enthalten [Biver, 2021].

Tabelle 5-3: Ascheanalyse einer Textilprobe

Parameter	Anteil	Einheit
Aluminium	2,53	M-%(Asche)
Barium	4,38	M-%(Asche)
Calcium	15,2	M-%(Asche)
Kalium	5,13	M-%(Asche)
Natrium	4,24	M-%(Asche)
Phosphor	4,02	M-%(Asche)
Schwefel	5,07	M-%(Asche)
Silicium	6,41	M-%(Asche)

## 6 Status quo zur Verfahrenstechnik des Textilrecyclings

### 6.1 Verfahren zum Recycling von Textilien

Der öffentliche und regulatorische Druck auf die Verwertung und Aufbereitung von Textilien und Bekleidung nimmt stetig zu. Neben der Verlängerung der Nutzungsphase und Vermeidung von Überproduktionen ist das Wiederverwerten - Recycling von Textilien - eine Strategie zur Reduzierung von textilen Abfällen. Der Markt für nachhaltige Konzepte unterliegt derzeit einem rasanten Wandel mit hoher Innovationskraft. Einige öffentlich geförderte Forschungsvorhaben beschäftigen sich entlang der textilen Produktionskette mit Konzepten zur besseren Wiederverwertung von Sekundärrohstoffen (wobei der bezogen auf die Bedeutung des textilen Sektors ungenügend hohe Einsatz von Forschungsmitteln in Deutschland noch mehr Fragen offenlässt als notwendig). Für das Recycling von Faserstoffen gibt es unterschiedliche Verfahren. Denen voran stehen immer die Erfassung, Sammlung und Sortierung der Alttextilien.

Die nachfolgende Abbildung 6-1 zeigt für die drei Rohmaterialgruppen, eingeteilt in Sekundärrohstoffe, Chemie- und Naturfasern, die Abfolge der Produktionsprozesse. Ab der Spinnereivorbereitung sind die Produktionsschritte unabhängig von der Art der Fasern. Die Maschinenparameter sind zwar entsprechend der Faserart, -ausrüstung und Faserlängenverteilung zu wählen, jedoch folgen die Produktionsschritte ab der Ebene der Garnherstellung der klassischen Herstellungsrouten für Textilien, entsprechend dem vorgesehenen Endprodukt. Dies ist unabhängig vom verarbeitenden Rohstoff. Beginnend bei der Spinnereivorbereitung über die Garnherstellung bis hin zur textilen Fläche und Konfektion werden so auch Sekundärrohstoffe als rezyklierte Rohmaterialien in die textile Kette rückgeführt.

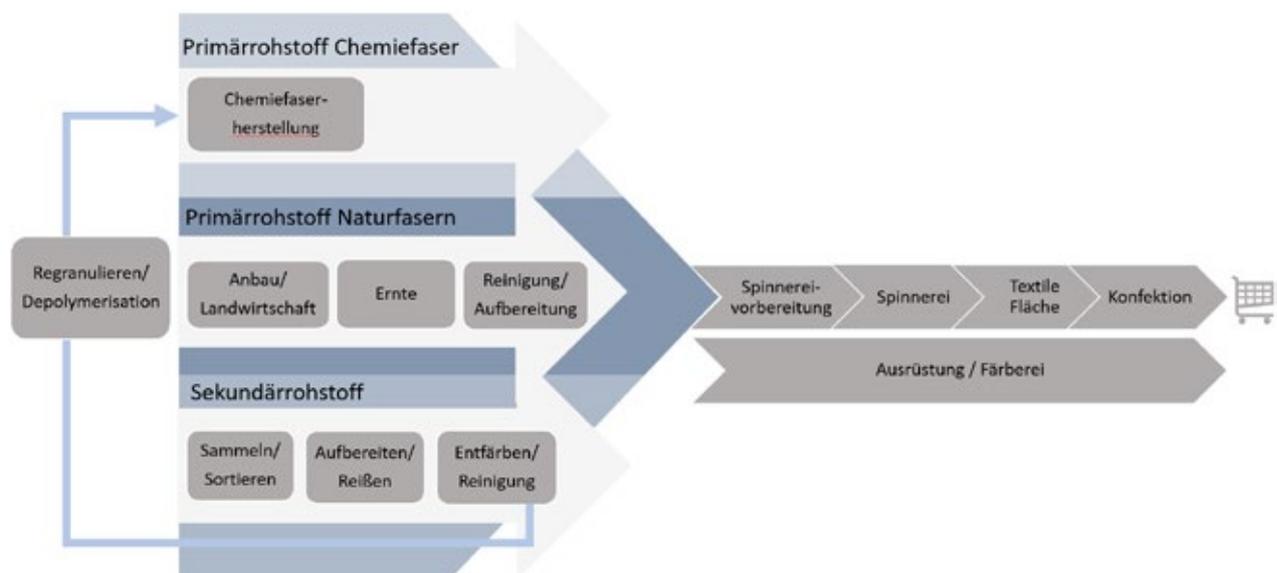


Abbildung 6-1: Abbildung Stoffstrom textile Kette

Wenn ein Textil nach der Nutzungsphase entsorgt wurde, ist es über Sammlungen und Sortierung einem geeigneten Recyclingverfahren zuzuordnen. Recycling beschreibt den Umwandlungsprozess von Abfällen in neue Materialien oder zu neuen Gegenständen. Umgangssprachlich wird noch weiter in Re-, Up- und Downcycling differenziert. Während Recycling als Rückführung der Materialien, durch Aufbereitung, in den Kreislauf verstanden wird, ist das Upcycling eine Aufwertung des ursprünglichen Produkts. Abfallprodukte, wie z. B. alte Möbel, werden kreativ behandelt und wieder als neues Handelsgut vermarktet. Beim Downcycling wird das ursprüngliche Material in ein schlechteres Produkt umgewandelt. Der ursprüngliche Rohstoff verliert dabei an Qualität und Wertigkeit, z. B. Verarbeitung von Textilien zu Putzlapen und Dämmstoffe.

Zur Rückführung in den Kreislauf stehen, abhängig vom Rohstoff und Verarbeitungsform, einige Methoden zur Verfügung, die allgemein in zwei technische Hauptkategorien, Physikalische und Chemische Verfahren, entsprechend den zugrunde liegenden Prozessen, eingeteilt werden können.

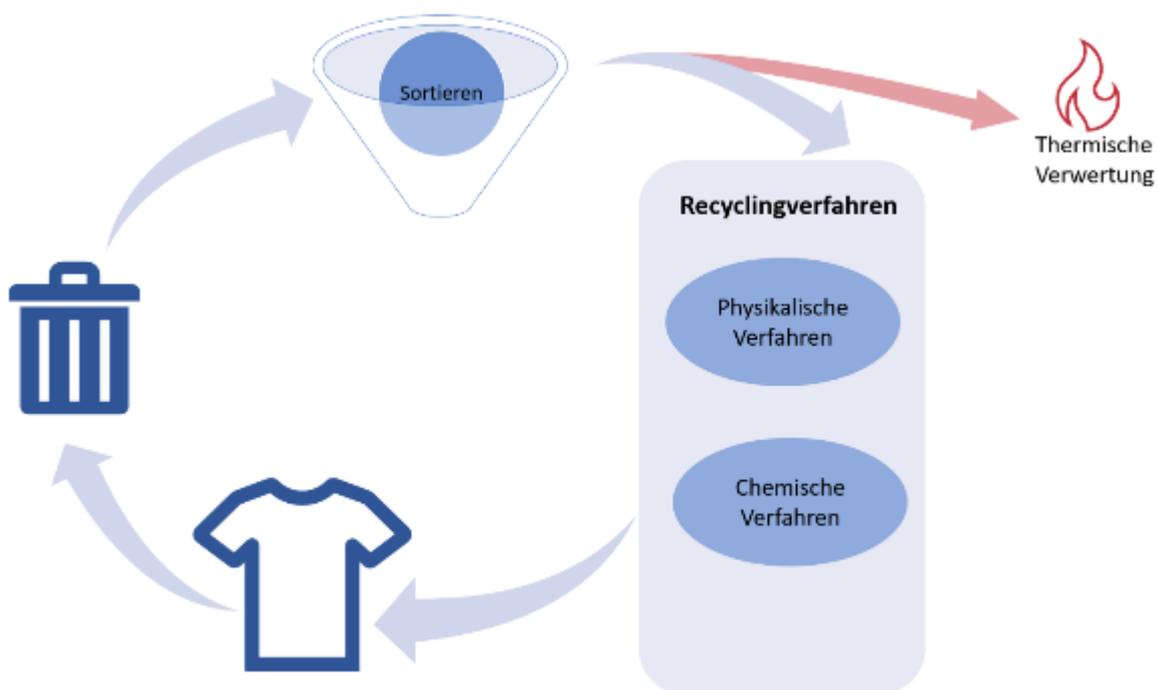


Abbildung 6-2: Darstellung Übersicht Recyclingverfahren

Nicht jede Technologie eignet sich für alle Faserarten. Innerhalb dieser Gruppen ist der Markt, sowohl seitens der Forschung als auch im Ausbau kommerzieller Anlagen, sehr dynamisch. Die Bewertung der Methoden unterliegt somit einem starken Wandel und ist nur temporär aussagekräftig. Mit Hilfe einer SWOT-Analyse werden im weiteren Verlauf, die Verfahren

technisch beurteilt und die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken aus heutiger Sicht aufgelistet.

Die Herausforderung des Textilrecyclings ist die enorme Materialvielfalt, bestehend aus verschiedensten Material- und Fasertypen, deren Kombinationen, sowie der Ausrüstung und Funktionalisierung der Faserstoffe.

Wird exemplarisch eine Jeans betrachtet, die auf den ersten Blick wenig komplex erscheint, besteht diese aus einem buntem Materialmix, der vorhandene Recyclingprozesse herausfordert. In vielen Jeanshosen ist neben gefärbter Baumwolle, Elastan für den Tragekomfort und Polyester zur Erhöhung der Abriebfestigkeit, eingearbeitet. Sowohl als Materialkombination im gesponnenen Garn, als auch als Schuss- und Kettfaden-Kombination im Gewebe. Zusätzlich finden sich auf jeder Jeans Kurzwaren in Form von Reißverschlüssen, Knöpfen und Nähbändern, die wiederum einen Materialmix darstellen.

Diese Konstruktionsmerkmale verkomplizieren die Wiederaufbereitung der Textilien zu Sekundärrohstoffen. Beispiele weiterer Störmaterialien für das Recycling sind:

- Einsatz von Fasermischungen
- Multilayer Materialien
- Hochfunktionelle Beschichtungen
- Kurzwaren
- Farben und Drucke
- Additive zur Funktionalisierung
- Sonstige Beschichtungen auf Fasern zur besseren Verarbeitung

Derzeit wird davon ausgegangen, dass das werkstoffliche Recycling sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile gegenüber rohstofflicher Verwertungsverfahren, wie z. B. dem Thermochemischen Recycling, hat. Der Einsatz von Zusatzstoffen, wie z. B. Chemikalien, oder von Energie ist gar nicht notwendig, bzw. sehr gering.

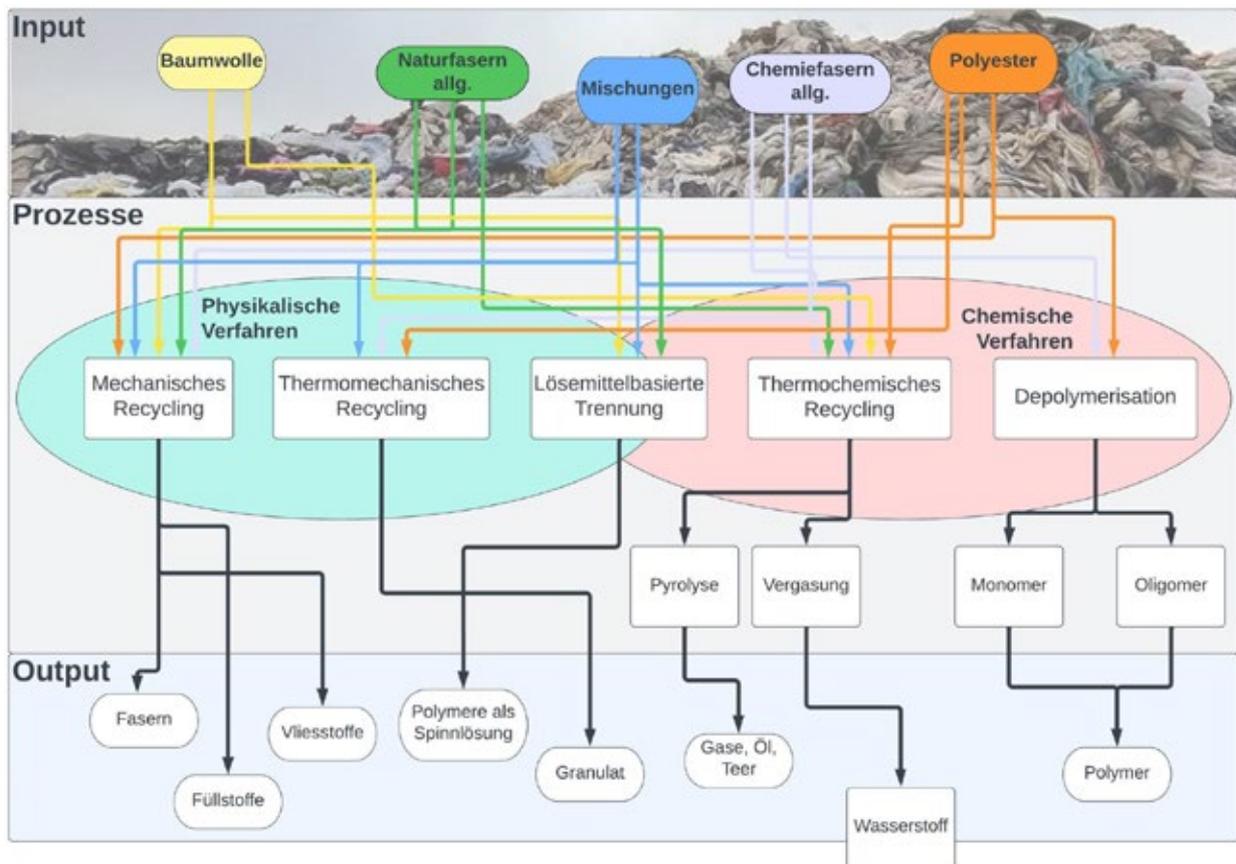


Abbildung 6-3: Routen verschiedener Recyclingverfahren

Die Grafik gibt einen Überblick über die Routen der Recycling-Möglichkeiten von textilen Faserstoffen. Als Input sind die zwei häufigsten Fasern, Polyester und Baumwolle, einzeln genannt. Alle anderen Fasern sind in der jeweiligen Fraktion zusammengefasst. In den zwei Gruppen der physikalischen und chemischen Verfahren gibt es weitere Prozesse zur Aufbereitung der Materialien. Abhängig vom gewählten Verfahren sind die erzeugten Produkte völlig unterschiedlich.

Physikalische Verfahren werden dem **werkstofflichen** Recycling zugeordnet. Dazu gehören die Verfahren, bei denen physikalische Prozesse zum Einsatz kommen. Die Materialstruktur, bzw. bei Kunststoffen auch die Polymerstruktur, der Eingangsmaterialien wird nicht verändert, lediglich wird der Aggregatzustand durch die Prozesse gewandelt. Das Ergebnis, bzw. der Output solcher Verfahren entspricht in der Struktur dem Eingangsmaterial (Input).

Dem gegenüber stehen die chemischen Verfahren, die dem **rohstofflichen** Recycling zugeordnet sind. Hier werden durch chemische Prozesse die Polymere in ihre Grundbausteine umgewandelt, bzw. depolymerisiert. [Janz, 2020]

Eine Sonderstellung nimmt dabei die Behandlung der Komponenten durch Lösemittel ein. Lösemittelbasierte Trennung kann je nachdem, ob die Polymerstruktur erhalten bleibt

(physikalisches Verfahren) oder chemisch aufgelöst wird (chemisches Verfahren), beiden Methoden zugeordnet werden und ist somit sowohl den werkstofflichen als auch rohstofflichen Recyclingverfahren zuzurechnen.

Wie bereits erwähnt, bestehen textile Stoffe auch aus verschiedenen Kunststoffen. Wie im Kunststoffrecycling stehen zur Verwertung die chemischen Verfahren (Pyrolyse, Vergasung, Verölung, Solvolyse) zur Verfügung.

In vielen nationalen als auch europäischen Forschungsvorhaben werden Konzepte und Innovationen erforscht. Es gibt verschiedene Recyclingstrategien, die sich in der Art der Verfahrenstechnik unterscheiden. Derzeit am häufigsten industriell angewandte Verfahren konzentrieren sich auf das Aufreißen und die Weiterverarbeitung zu Polyesterfüllungen, was weniger eine Rückführung der Rohstoffe in den Kreislauf, als ein sogenanntes Downcycling bedeutet. [HLNUG, 2020]

Zur Beurteilung und Einteilung des Entwicklungsstands neuer Raumfahrttechnologien führte die NASA 1988 den „Technology Readiness Level“ (TRL) ein. Der technologische Reifegrad wurde mittlerweile auch zur Beurteilung von Produktions- und Zukunftstechnologien adaptiert. Die Skala beginnt mit TRL 1, was der Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips entspricht und endet mit TRL 9, dem qualifizierten und erfolgreichen Einsatz der Technologie. Die Verfahren zum Recycling von Textilien differieren in der Funktion und Anwendung sehr stark. So wird das mechanische Recycling mit TRL 9 bewertet, wogegen das chemische Recycling, bei dem die Polymere zurück zu den Monomeren depolymerisiert werden, mit TRL 4 (Versuchsaufbau im Labor) bewertet wird. [ITAA, 2022]

Des Weiteren ist zu beachten, dass die Sortenreinheit der eingebrachten Stoffe aktuell noch ausschlaggebend für die Durchführung und Qualität der jeweiligen Verfahren ist. Das Regranulieren der Kunststoffe aus textilen Fasern ist nur mit hoher Sortenreinheit und geringem Verschmutzungsgrad der zugeführten Materialien möglich. Die Recyclingverfahren unterscheiden sich also nicht nur in Art und Technik, sondern auch in Hinblick auf die eingehenden Stoffströme (Input), deren Kreislauffähigkeit, den Energieeinsatz und den Rezyklaten (Output). Folgende Tabelle 6-1 schafft einen Überblick über das TRL der in dieser Studie betrachteten Recyclingverfahren:

Tabelle 6-1: Technologiereifegrad der betrachteten Recyclingverfahren

<b>Werkstoffliche Recyclingverfahren</b>	<b>TRL</b>
Mechanisches Recycling	TRL 9
Lösemittelbasiertes Recycling	TRL 7
Lösemittelbasiertes Recycling für Mischtextilien	TRL 4
Thermomechanisches Recycling	TRL 8
Thermomechanisches Recycling für textile Sekundärstoffe	TRL 4
<b>Rohstoffliches Recycling</b>	<b>TRL</b>
Chemisches Recycling	TRL 4 bis 8
Chemisches Recycling für textile Sekundärrohstoffe	< TRL 4 bis 8
Thermochemisches Recycling	TRL 7
Thermische Verwertung	TRL 9

## 6.2 Werkstoffliche Recyclingverfahren

### 6.2.1 Mechanisches Recycling

Gemäß Abfallhierarchie steht nach der Abfallvermeidung das werkstoffliche Recycling an zweiter Stelle. Für Textilien bedeutet es unter physikalischer Belastung eine mechanische Zerlegung der Stoffe zurück zur Einzelfaser. Das Aufreißen der Stoffe und das sogenannte Öffnen der Fasern ist eine etablierte und kosteneffiziente Methode, welche schon um 1900 angewendet wurde. [Rohn, 1910]

Je nachdem ob es sich um flächige Textilien oder Garnreste handelt, werden die Fasern, auch Rückfasern genannt, stufenweise durch Ausreißen, Zerreißen oder Abzupfen aus dem festen Faserkörper gewonnen. Die Rückfasern sind durch die mechanische Belastung meist kürzer als in der Erstverarbeitung. Für günstige Mode, der sogenannten „Fast Fashion“, werden meist qualitativ schlechtere Neufasern eingesetzt, die in der Regel bereits kürzer sind. Durch das mechanische Recycling werden diese Fasern abermals gekürzt, was eine Grenze der Rückführung in den textilen Kreislauf bedeutet. Zu kurze Fasern können in den herkömmlichen Spinnprozessen nicht wieder zu qualitativ hochwertigen Garnen versponnen werden. Hier bleibt nur ein Downcycling zu Produkten, wie z. B. Putzlappen oder Malervliesen, übrig.

Weitere Anwendungen finden sich für diese geschredderten Rückfasern unter anderem in der Automobilindustrie und Möbelindustrie als Füllstoffe oder Polsterungen.

Für hochwertiges und faserlängenerhaltenes mechanisches Recycling sind die Ausgangsfasern entsprechend lang zu wählen. Alternativ bzw. ergänzend können durch schonenderes Aufreißen die Faserlängen teilweise erhalten bleiben und die Rückfasern wieder zu Garnen versponnen und somit in den textilen Kreislauf rückgeführt werden. Mischungen mit neuen Fasern verbessern die Verarbeitbarkeit von Rückfasern.

Mechanisches Recycling ist für alle Fasertypen, Natur- und Chemiefasern, möglich.

Tabelle 6-2: SWOT-Analyse Mechanisches Recycling

SWOT	Stärken	Schwächen
<b>Chancen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faserstoff bleibt erhalten – CO<sub>2</sub> Rucksack gering</li> <li>- Geringer Energieaufwand, positiv für Lebenszyklusanalyse</li> <li>- Einfache Prozesstechnik mit vorhandenen Maschinen</li> <li>- keine umweltgefährdenden Chemikalien/Lösemittel erforderlich</li> <li>- Prozess ist auch bei geringen Mengen und Materialvariation durchführbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faserlängenkürzung (durch weitere Verbesserung der Prozesse Potential zur Verbesserung Faserlängenverteilung &amp; Inhomogenität)</li> <li>- Reinigungsstufen in Nachfolgeprozessen erforderlich zur Verbesserung der Qualität</li> </ul>
<b>Risiken</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibler Prozess, einfach auf verschiedene Ausgangsstoffe einzustellen, aber hohes Prozessverständnis und spezielles Anpassen auf einzelne Materialchargen erforderlich</li> <li>- Gegenwirken mit KI möglich – Erkennung des Eingangsmaterials und Anpassung der Folgeprozesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einkürzung der Fasern</li> <li>- Materialverluste durch zu kurze Fasern, Stäube etc.</li> <li>- Endlicher Recyclingprozess (Kreislauf auf Dauer nicht möglich, da neues Material in Kreislauf eingebracht werden muss)</li> </ul>

### 6.2.2 Lösemittelbasierte Trennung

Fasermaterialien und Textilien können sowohl physikalisch als auch chemisch mit Lösemitteln aufgelöst werden. Hier wird das Material durch den Einsatz von Lösemitteln aus der Materialmischung gelöst. Ein bekanntes Verfahren ist die Herstellung von Viskose, bzw. cellulosischen Chemiefasern. Ebenso kann Cellulose zu Partikel zerkleinert und in einer Flüssigkeit

homogenisiert werden. Aus dem Zellstoff werden dann durch Lösungsspinnverfahren regenerierte Cellulosefasern hergestellt. [CycleTex, 2022]

Dabei muss beachtet werden, dass aufgrund unterschiedlicher chemischer Struktur und Viskosität der verschiedenen Quellen für Cellulose, Anpassungen der Verfahren notwendig sind. Hier kommen hydrothermale Recyclingverfahren oder enzymatische Verfahren zur Anwendung. Die aus den polymeren Eingangsmaterialien gewonnenen regenerierten cellulosischen Fasern können der textilen Wertschöpfungskette wieder direkt zugeführt werden. Es können aber nicht nur natürliche, sondern auch synthetische Polymere ausgelöst werden. Polymere aus Alttextilien, bestehend aus vielen Rohstoffmischungen, können mit diesem Verfahren ausgelöst und zu neuen Fasern versponnen werden.

Tabelle 6-3: SWOT-Analyse Lösemittelbasiertes Recycling

SWOT	Stärken	Schwächen
<b>Chancen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rückgewinnung des Ausgangsmaterials aus Mischtextilien möglich</li> <li>- Schonender Prozess für das Material</li> <li>- Kann potenziell unempfindlich gegen Störstoffe und Verschmutzungen sein</li> <li>- Hohe Gleichmäßigkeit und Reinheit in neuen Produkten</li> <li>- Faserlänge nicht ausschlaggebend für Rezyklat Qualität</li> <li>- Neue Prozesse (Renewcell, Eeden) bieten die Möglichkeit der Auflösung von Cellulose → Herstellung von Viskosefasern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hoher Energieaufwand (Temperatur wird Löseprozess beschleunigen) – ggf. Potential zur Reduzierung &amp; Lebenszyklusanalyse erforderlich (Kann auch Risiko sein!)</li> <li>- Anfällig für Störstoffe – Ausreinigung wahrscheinlich einfacher als bei Thermo-mechanisch und im Prozess möglich</li> <li>- Faserlänge wird nicht erhalten → Prozess damit für extrem kurze Fasern geeignet</li> <li>- Muss für jedes Fasermaterial einzeln entwickelt werden (Chance: hocheffiziente Prozesse für einzelne Materialien)</li> </ul>
<b>Risiken</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prozesse bedürfen noch einer Hochskalierung, um industriereife und resiliente Prozesse zu erzeugen, die wirtschaftlich sind</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lösemittel sind kritisch für Arbeitssicherheit – ggf. Entwicklung &amp; Nutzung unschädlicher Lösemittel</li> <li>- Aufwändige Prozesstechnik für Lösemittelrückgewinnung und Reinigung des Lösemittels</li> <li>- Aus Mischtextil wird i.d.R. nur eine Komponente zurückgewonnen → Verlust der zweiten Komponente</li> <li>- Batchbetrieb oder kontinuierlicher Betrieb? – Produktivität ggf. nicht gegeben</li> </ul>

### 6.2.3 Thermomechanisches Recycling

Eine weitere mechanische Technologie zur Wiederaufbereitung der Rohstoffe ist das Thermomechanische Recycling. Als geeignete Ausgangsstoffe sind hier thermoplastische synthetische Fasern, wie Polyester- und Polyamidfasern zu nennen. Die Kunststoffe sollten nicht verschmutzt und möglichst ohne Störstoffe in den Prozess geführt werden. Durch Aufschmelzen und durch das mechanische Wirken eines Extruders, werden die Materialien zu neuen Granulaten verarbeitet. Dieses Verfahren wird derzeit typisch für nicht textile Anwendungen, wie z. B. für PET-Flaschen, verwendet. Die Anfälligkeit dieses Verfahren auf Störstoffe und Mischungen begrenzt die Anwendung im textilen Prozess. Zudem muss beachtet werden, dass der Polymerisationsgrad (Kettenlänge) des entstehenden Re-Granulats z. T. für die Verspinnung zu textilen Fasern und dem nachfolgenden Verstrecken zu gering ist. Dagegen ist die Aufbereitung von hochreinen PET-Flaschen zu Spinnmassen für textile Polyesterfasern bereits in der Anwendung.

Tabelle 6-4: SWOT-Analyse Thermomechanisches Recycling

SWOT	Stärken	Schwächen
<b>Chancen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trotz geringer Qualität des Ausgangstextils, hohe Gleichmäßigkeit und Reinheit in neuen Produkten</li> <li>- Endlosfasern herstellbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hoher Energieeinsatz (Genaue Werte sind zu prüfen) – Potential zur Reduzierung ggf. noch nicht ausgeschöpft</li> <li>- Lebenszyklusanalyse erforderlich (Kann auch Risiko sein!)</li> <li>- anfällig für Störstoffe – Gute Sortierung und Zuschnitt erforderlich und mit KI erreichbar</li> <li>- Zerkleinerung durch mech. Aufbereitung erforderlich – zusätzlicher Prozessschritt, ggf. kann dieser Schritt bei guter Sortierung entfallen? Prüfung erforderlich</li> <li>- Ausspinnung aus Regranulat bisher nicht stabil → Anwendung z. B. im Spritzguss oder anderen Verfahren (nicht-Textil)</li> </ul>
<b>Risiken</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rückgewinnung des Ausgangsmaterials – Temperatur reduziert ggf. Kettenlänge</li> <li>- Hohes Prozessverständnis erforderlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einkürzung von Molekülketten – stabile Faserausspinnung aus Regranulat evtl. auch zukünftig nicht möglich → Entwicklung in Sackgasse</li> </ul>

## 6.3 Rohstoffliches Recycling

### 6.3.1 Chemisches Recycling

Unter dem Begriff „Chemisches Recycling“ fallen viele unterschiedliche Anwendungen zur Rückgewinnung von Rohstoffen über chemische Prozesse. Hier werden u.a. die Ausgangsstoffe depolymerisiert, das Grundgerüst des Ursprungpolymers verändert oder durch Zersetzungsreaktionen die chemischen Verbindungen zerlegt. Es handelt sich also um eine Umkehrung der Additionsreaktion, bzw. Polymerisation, bei der die Ausgangsstoffe wieder in Moleküle zerlegt werden. Es gibt die Möglichkeit Polymere zurück zu Monomeren oder in kurze Polymerketten, den Oligomeren, zu spalten. Der Entwicklungsstand beider Methoden wird unterschiedlich bewertet. Die Spaltung in kurze Polymerketten wird in TRL 8 (Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich) eingeordnet, wogegen die Auflösung zu Monomeren erst im Labormaßstab durchgeführt und daher mit TRL 4 bewertet wird.

Das chemische Recycling erfolgt über verschiedene Verfahren, die auch nacheinander erfolgen können, um den Ausgangsstoff zu depolymerisieren, ihn wieder zu polymerisieren und weiter daraus Fasern zu spinnen oder Ausgangsstoffe zur Kunststoffherstellung zu gewinnen. Die zu Grunde liegenden Prozesse bedienen sich bekannter chemischer Verfahren, wie Glykolyse, Hydrolyse und Alkoholyse. Zu den thermochemischen Verfahren gehören außerdem Hydrocracken, Pyrolyse und Vergasung, die in der Regel in Gegenwart von Katalysatoren bei hohen Temperaturen durchgeführt werden. [Damayanti 2021] Bei biochemischen Verfahren werden Enzyme oder Mikroorganismen in Recyclingprozessen, wie der enzymatischen Hydrolyse, eingesetzt. [Piribauer 2019] Je nach Art des Abfalls sind zur Vorbehandlung der Eingangsmaterialien verschiedene Reinigungs-, Sortier- und Trennungsschritte sowie ggf. Schreddern, Mahlen, Waschen, Granulieren und/oder Pelletieren notwendig. Die Polymerisation durch weitere chemische Reaktionen rückgängig zu machen, erfordert hohe Prozesstemperaturen, -drücke und Einsatz von chemischen Substanzen, was sich negativ auf die Energiebilanz dieser Verfahren auswirkt. [UmBu 2021]

Die Abbildung 6-4 zeigt weitere Routen chemischer Recyclingverfahren für textile Faserstoffe mit Rücksicht auf die geeigneten Inputmaterialien.

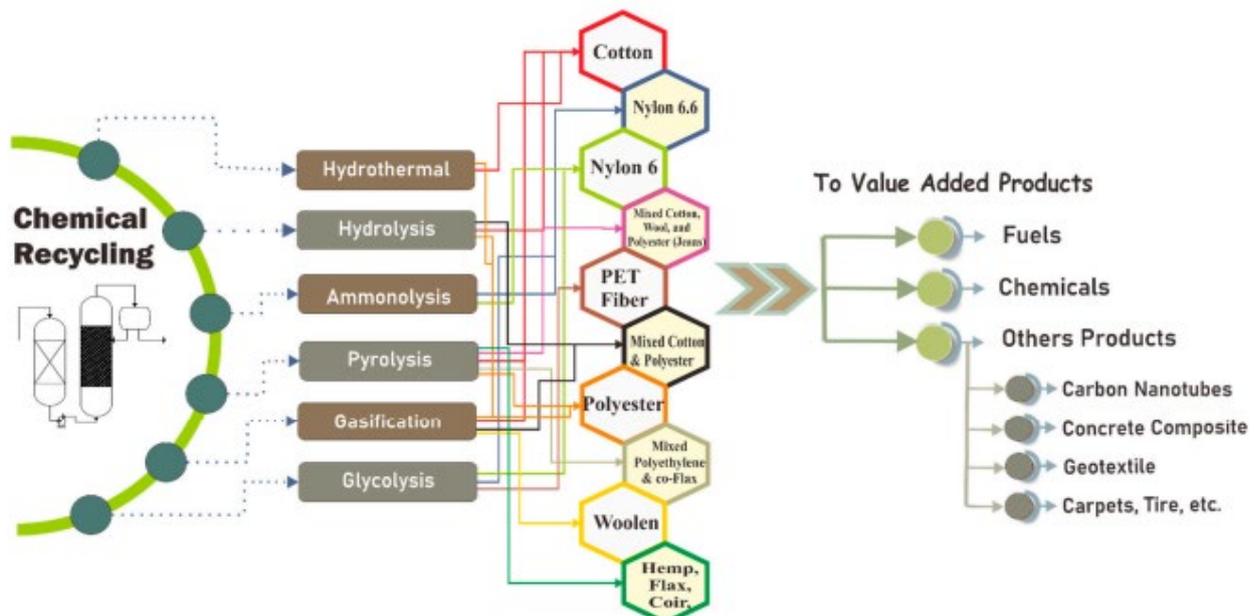


Abbildung 6-4: Mögliche Wege Chemischer Verfahren im Textilrecycling [Damayanti 2021]

### 6.3.2 Thermochemisches Recycling

Bei diesem Verfahren handelt es sich weniger um ein Recycling als ein Verfahren zur Verwertung schwer recyclebarer Kunststoffe. Es beinhaltet thermische Umwandlungsprozesse, wie Vergasung und Pyrolyse. Vorteil ist die Eignung für gemischte organische Abfälle, die so stofflich verwertet werden können. [MaGo, 2016]

Sowohl die Vergasung als auch die Pyrolyse sind erprobte und gängige Verfahren in der Praxis bei denen petrochemische Rohstoffe gewonnen werden. Allerdings auch nur in Abhängigkeit des zugeführten Materials einwandfrei funktionieren und einen entsprechenden Output generieren können. Solche Anlagen sind mit hohen Betriebskosten und Investitionen verbunden, die erst mit einem hohen Durchsatz wirtschaftlich zu betreiben sind.

Die Textilien, die aufgrund ihrer Zusammensetzung in den vorherig genannten Verfahren keiner geeigneten Verwertung zugeführt werden können, können auch hier zugeführt werden. Allerdings immer unter dem Aspekt der verfahrensgerechten Aufbereitung (Sauberkeit, Reinheit, Größe) und den Anspruch auf Reinheit der Inputmaterialien.

Die, in diesem Bericht nachfolgend ausführlich beschriebene, Erzeugung von Wasserstoff aus Alttextilien zählt ebenfalls zu den thermochemischen Verfahren.

Tabelle 6-5: SWOT-Analyse Chemische Recyclingverfahren

SWOT	Stärken	Schwächen
<b>Chancen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erzeugung von Monomeren → Neue Kettenbildung und damit Materialqualität wie Erstanwendung erreichbar</li> <li>- Gute Ergänzung zum mechanischen Verfahren, da Reststoffe wie Stäube und zu kurze Fasern als Ausgangsstoff für das chem. Recycling dienen</li> <li>- Potentiell hohe Unabhängigkeit von der Zusammensetzung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Je nach Verfahren Pyrolyse, Solvolyse, Vergasung ist Energiebilanz unterschiedlich und Prozesstechnik aufwändig</li> <li>- Generell: Hoher Energie- und Prozessaufwand – Lebenszyklusanalyse zur Bewertung erforderlich</li> </ul>
<b>Risiken</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unabhängigkeit von der Zusammensetzung → für wirtschaftlichen Betrieb müssen evtl. Spezialprozesse je nach Ausgangsmaterial entwickelt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abhängig vom Verfahren anfällig für Störstoffe – Exzellente Vorsortierung und Vorbereitung erforderlich → zusätzlicher Prozessschritt des mech. Recycling zur Zerkleinerung notwendig</li> <li>- Farben etc. können problematisch sein, sodass ein hoher Anteil an Material nicht für den Prozess geeignet ist</li> <li>- Große Mengen des gleichen Materials für kontinuierlich hohe Prozessqualität erforderlich</li> <li>- Reststoffe müssen entsorgt werden</li> <li>- Hoher Entwicklungsaufwand, der zu geringem Vorteil ggü. der thermischen Verwertung führt</li> <li>- Hoher Energie- und Ressourcenbedarf mit erheblichen ökologischen Auswirkungen</li> </ul>

### 6.3.3 Thermische Verwertung

Ein weiteres Verfahren zur Verwertung von Abfällen und somit auch von Textilabfällen ist die thermische Verwertung. Unter Anwesenheit von Sauerstoff können textile Abfälle, beispielsweise in einem Müllheizkraftwerk, thermisch zersetzt werden. Fasermaterialien weisen dabei unterschiedliche Heizwerte auf. Die brennbaren, überwiegend organischen Bestandteile gehen für den Kreislauf irreversibel verloren, während die anorganischen Bestandteile in Asche übergehen.

Die thermische Abfallbehandlung steht an vorletzter Stelle der fünfstufigen Abfallhierarchie und ist kein Recyclingverfahren. Sie ist deshalb gegenüber dem stofflichen Recycling nachrangig anzuwenden. Im Rahmen der weiteren Verfolgung der „EU strategy for sustainable and circular textile“ wird in den nächsten Jahren die thermische Verwertung, wie auch die

Deponierung von Textilien in der EU verboten oder zumindest stark eingeschränkt werden. In Deutschland gilt das Deponieverbot bereits.

Tabelle 6-6: SWOT-Analyse Thermische Verwertung

SWOT	Stärken	Schwächen
<b>Chancen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schadstoffe im Material werden zerstört</li> <li>- Hohe Unabhängigkeit vom Materialmix</li> <li>- Geringe Kosten, wenn mit Hausmüll verbrannt wird, da keine getrennte Sammlung/keine neuen Anlagen erforderlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material wird dem Kreislauf entzogen → dadurch aber keine Gefährdung durch kritische Reststoffe im Rezyklat möglich (chemisch, biologisch)</li> </ul>
<b>Risiken</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energie wird aus dem Material gewonnen und nutzbar gemacht</li> <li>- Aus Materialmix folgen schlecht vorhersehbare Verbrennungsgase, die aufwendig gereinigt werden müssen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material geht irreversibel verloren</li> <li>- Nicht verwertbare Rückstände wie Asche und Schlacke müssen deponiert werden</li> </ul>

## 6.4 Forschungsstand zu Recyclingvorhaben

### 6.4.1 Mechanisches Recycling und Verarbeitung rezyklierter Fasern zu Garnen

In Deutschland sind bereits einige der wenigen verbliebenen Spinnereien dabei, Recyclingkonzepte in einzelnen Anwendungen umzusetzen. Zu nennen ist hier die Velener Textil GmbH, die mit dem Konzept WECYCLE Reste aus Baumwollgarnen und -geweben zurückholt, sortiert und wiederaufbereitet [Velener, 2022]. Ebenso beschäftigt sich die Gebrüder Otto Dietenheim GmbH&Co.KG mit ihrem Produkt recot2 mit der Entwicklung eines Spinnverfahrens zur Beimischung von 25% recycelter Baumwolle aus Spulfäden und Webkanten [Otto,2021].

In einem INTERREG geförderten Projekt wird von einem internationalen Konsortium ein Spinnverfahren modifiziert, um Garne aus bis zu 100% recycelten Mischfasern herzustellen [INTERREG, 2019].

Das Sächsische Textilforschungsinstitut e.V. (STFI) und die DITF (Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf) erarbeiten in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben eine Klassifizierung von Recyclingfasern [RohKla, 2022]. Dabei werden Textilabfälle, überwiegend T- Shirts aus Baumwolle und Produktionsabfälle aus Aramid zerkleinert, iterative Reißversuche durchgeführt und die rezyklierten Fasern charakterisiert.

Einen völlig neuen methodischen Ansatz wählt das vom ITA Augsburg entwickelte und zusammen mit der Hochschule Augsburg realisierte Konzept einer Modellwerkstatt (s.a. Kapitel 11.2). In einer modellhaften Realisierung des mechanischen Recyclingprozesses werden in

sieben Schritten von der Sammlung und Sortierung über die Vorbereitung, Verspinnung und Flächenherstellung bis hin zur Konfektion neue Produkte entwickelt. Eine intensive Prozessoptimierung mit Hilfe von Methoden der KI und die bessere Abstimmung der einzelnen Prozessschritte versprechen eine Minimierung der Faserschädigung und somit höherwertige Produkte. Wegen der besonderen Bedeutung des Rohstoffs Carbon konzentrierten sich in den letzten Jahren verstärkt auch Forschungsarbeiten auf die Rückgewinnung von Compositefasern in den Werkstoffkreislauf [ITA 2022], vielfach auf Basis des mechanischen Recyclings.

### 6.4.2 Chemisches Recycling

Neben dem mechanischen Recycling von Fasern ist das chemische Recycling Gegenstand vieler Forschungsarbeiten, insbesondere in der Anwendung bei synthetischen Fasern und Mischungen.

Versuche zur Regranulierung zeigen noch Defizite in der Qualität und Verarbeitung, besonders wenn versucht wird ein Faser-zu-Faser Recycling zu betreiben und nicht Granulate aus Bottle Flakes verwendet werden [Debicki, 2021].

Eine Forschungsgruppe an der TU Wien beschäftigt sich im Verbundprojekt SCIRT neben der Entwicklung von einem TRUE-Cost-Model und der Einrichtung eines EPR-Systems für eine erhöhte Transparenz der Wertschöpfungskette [SCIRT, 2021] auch mit der Wiederaufbereitung von Mischtextilien aus Polyester und Baumwolle.

Das EU Projekt TRASH 2 CASH untersuchte das chemische Recycling von Abfällen aus cellulosischen Rohstoffen, Polyester sowie aus Mischungen der Rohstoffe. Ziel ist der Wiedereinsatz von Polyester in nichttextilen Anwendungen sowie der Wiedereinsatz cellulosischer Polymere in Textilien [Trash2Cash, 2019].

Neue Entwicklungen gibt es hinsichtlich einem biochemischen Recyclingverfahren, bei dem ein speziell entwickeltes Polymerase-Enzym als Katalysator die Polymerkette in Monomere aufspaltet. [CycleTex, 2022]

Die Firma RITTEC entwickelte im Rahmen der Forschungsinitiative DiTex ein innovatives Verfahren für das chemische Recycling von Textilien aus Polyester. Neben der technischen Machbarkeit ist vor allem der ökonomische Aspekt für Unternehmen interessant. In diesem Verfahren werden die Polyesterabfälle und -textilien nach dem Schreddern zunächst pelletiert, bevor eine Rückwandlung der Polyester auf Monomer Ebene erfolgt. Aus dem gewonnenen Monomeren konnten sowohl PET-Flaschen als auch Textilfasern gesponnen werden. [RITTEC, 2022]

Das französische Unternehmen Carbios entwickelte das enzymatische Recycling von den Produkten aus Polyester weiter. Durch eine Depolymerisation mittels patentierter Enzyme können PET-Flaschen und mittlerweile auch Textilien ohne Zufügung weiterer Lösemittel bei niedrigen Temperaturen ohne Qualitätsverlust repolymerisiert zu werden [Carbios,2022]

### 6.4.3 Recycling von Alttextilien

Die vielfältige Materialzusammensetzung von Textilien und die oft fehlende Kennzeichnung der Mischungen erschweren die Sortierung und auch die Bestimmung eines geeigneten Recyclingverfahrens. Die Sortierung der Alttextilien erfolgt derzeit überwiegend von Hand und deren Qualität ist eine Voraussetzung und die Basis für die Wiederverwertbarkeit und Recyclingfähigkeit der Faserstoffe.

Bestrebungen, die Erkennung der Mischungen und Sortierung der Ware zu automatisieren sind vorhanden. Eine Pilotanlage zur Sortierung textiler Abfälle mittels NIR-Spektroskopie wurde installiert. Bis diese uneingeschränkt nutzbar ist, sind noch weitere Forschungsarbeiten notwendig [SOEX, 2022]. Die Sortierung erfolgt hier nach Art des Materials. Konzepte für weitere Sortierkriterien, z. B. Ausrüstung, Flächenart, Anteil Mischungen, werden noch nicht berücksichtigt sind aber angedacht.

Ausgelöst durch den GreenDeal werden europaweit Netzwerke und Forschungsvorhaben zur Erarbeitung von Recyclingkonzepten installiert. Forschungszentren in Nordfrankreich, Spanien, Portugal und Italien betreiben vielfältige Forschung, um die wachsenden Textilabfallmengen zu reduzieren und die Sekundärrohstoffe rückzuführen.

Die EMPA forscht im Netzwerk SUBITEX an katalytischen Spinnverfahren und „grünen“ Lösungsmitteln für das Nassspinnen [EMPA, 2020].

In der Industriepartnerschaft wear2wear™ wird in einem europäischen Konsortium versucht neue Textilien ausschließlich aus recyclingfähigen und sortenreinen Materialien herzustellen. Bei den gewählten Produktbeispielen schließt sich der Rohstoffkreislauf. Allerdings ist dieses Konzept nicht auf die gesamten Alttextilien anwendbar. [wear2wear, 2019]

Das ZIM-Kooperationsnetzwerk Re4Tex hat zum Ziel die Weiterentwicklung bestehender, sowie die Entwicklung neuer Technologien zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus textilen Produktionsabfällen. Arbeitsschwerpunkte sind neben der Verarbeitung von nicht zur Faser aufgelösten Produktionsabfällen auch deren Direktverarbeitung. [Re4Tex, 2022]

Das ambitionierte Konzept von der „Faser zur Faser“ ist das Ziel von DiTex, ebenfalls einem Verbundprojekt, gefördert im Rahmen der Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe in dem neben der Entwicklung eines intelligenten

Etiketts, kreislauffähige Produktdesigns geschaffen und als Machbarkeitsstudie kreislaufgeführte Berufsbekleidung und Bettwäsche aus Rezyklatfasern erprobt werden. [DiTex, 2022]

Des Weiteren wurden sowohl für die Spinnerei- als auch die Vliesstofftechnologie in mehreren abgeschlossenen und laufenden Projekten prozesstechnische und maschinenbauliche Anpassungen, mit dem Ziel, die Faserschädigung von Rezyklatfasern (hier von rezyklierten Carbonfasern) zu minimieren durchgeführt. Mit dem Einsatz von Künstlicher Intelligenz und Modifikation der Maschinenelemente werden Prozesse untersucht das Recycling von Fasern, vor allem Kohlenstofffasern, schonender zu gestalten und die Faserschädigung zu mindern. [ITA, 2022]

Im Forschungsvorhaben RecyCard (IGF Nr. 22256 N/1) soll der Recyclingfaseranteil von Post-Consumer-Baumwolltextilien bei der Garnherstellung auf bis zu 50% ohne eine wirksame Verschlechterung der Garn- und Produktqualitäten, erhöht werden.

Im Projekt DiDe4Rec (TTP-LB Programm des BMWK) wird ein ganzheitlicher Entwicklungsansatz für kreislauffähige Leichtbauprodukte auf Basis faserverstärkter Thermoplaste erstmalig in Anwendung des Design for Recycling Ansatzes untersucht.

Das Entfärben und neu Färben von Rezyklaten ist ebenfalls eine Herausforderung an zukünftige Recyclingprozesse und ist sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch ein kritischer Punkt im Recycling von Alttextilien. Eine hochwertige, gleichmäßige Färbung entscheidet maßgeblich über die Akzeptanz von Recyclingtextilien. Gleichzeitig geht von den zum Entfärben und Färben verwendeten Chemikalien eine relevante Umweltgefährdung aus. Prozesse zum Entfärben der Rückfasern können die Polymere unter anderem strukturell schädigen und im weiteren Verlauf Einfluss auf die Färbbarkeit, Veredlung und die textile Prozesstauglichkeit der Sekundärstoffe nehmen. [Maryan,2015]

Die Aufzählung dieser Auswahl an öffentlichen Forschungsvorhaben zeigt das Interesse, die Dringlichkeit und Notwendigkeit an Investitionen zur Entwicklung kreislauffähiger textiler Prozesse und Produkte. Allerdings erfordern recyclingfähige Materialkompositionen bereits ein Umdenken in der Designphase von Textilien und Bekleidung in Richtung Ecodesign und Design for Recycling.

## 6.5 Ökonomische Bewertung der Verwertungsoptionen von Sekundärfasern

Neben den positiven ökologischen Auswirkungen, welche das Recycling von Textilien mit sich bringt, haben Recyclingverfahren eine bessere Marktchance, wenn sie bei gleicher Qualität auch ökonomische Vorteile bieten. Die Kostenstruktur in den Herstellungsprozessen von kreislauffähigen Textilien müssen langfristig denen einer linearen Produktionskette mit Primärrohstoffen entsprechen. Nur dann wird dieser Wirtschaftszweig ein attraktives Investment mit neuen Marktchancen. Die einzelnen Recyclingverfahren sollten dabei nicht in Konkurrenz stehen, sondern vielmehr als Abfolge der Verwertungspyramide verstanden werden, in der die Primärrohstoffe in verschiedenen Produktstadien in den Kreislauf und die textile Prozesskette als Sekundärrohstoffe zurückgeführt werden können.

Ausschlaggebend für den Erfolg einer Recyclingmethode sind sowohl ökologische Aspekte als auch ökonomische Vorteile gegenüber der Verarbeitung von Primärrohstoffen.

Das mechanische Recycling, insbesondere Faserrückgewinnung durch Aufreißen, von Textilien ist derzeit industriell skaliert, am weitesten verbreitet und daher kostenseitig gut einzuordnen. Die Prozesse sind bekannt und bedürfen keines zusätzlichen Energieaufwands und Ressourceneinsatzes. Chemische Verfahren setzen entsprechende Anlageninvestitionen, einen hohen Energieeintrag und ein großes Volumen an gleichbleibenden Eingangsmaterialien voraus. Allerdings sind manche Verfahren heute so weit, dass das erzeugte Rezyklat der Qualität der Rohfasern sehr nahekommt und somit auf der Ertragsseite vielversprechend sind. Chemische Recyclingverfahren sind für die Verwertung von Kunststoffen bereits weiterentwickelt als für textile Sekundärfasern. Das liegt unter anderem an den bereits beschriebenen Materialmischungen, Störstoffen, Sammel- und Sortiermöglichkeiten. Für eine sinnvolle ökonomische Bewertung von textilen Recyclingverfahren ist es bei vielen der heute intensiv beforschten Prozessansätze jedoch noch zu früh, da es durchweg an industriell skalierten Prozessen fehlt. Selbst im optimistischen Ansatz einer industriefähigen Anlage, die in den meisten Verfahrensvarianten frühestens in 5 bis 7 Jahren gesehen wird, verbleiben erhebliche Mehrkosten, so dass eine deutliche Produktions-Kostensteigerung bei den chemischen Verfahrensvarianten als sicher angenommen werden kann. In Tabelle 6-7 werden vier typische textile Recyclingverfahren und die beiden Rahmenprozesse, das Sammeln/Sortieren von Alttextilien und das Design for Recycling, gegenübergestellt und aus der textilen Perspektive und aus heutiger Sicht in Hinblick auf die resultierende Qualität, Energieeffizienz und Kosten eingestuft.

Tabelle 6-7: Übersicht Bewertung Recyclingverfahren aus textiler Sicht

	Sammeln und Sortieren	Mechanisches Recycling	Thermo-mechanisches Recycling	Chemisches Recycling	Thermo-chemisches Recycling	Produktgestaltung / Design for Recycling
						
	Alttextilien	Faser	Polymer	Monomer/Polymer	Synthesegas	Textilien
<b>Bewertung</b>	<b>Qualität</b>	—	~	+	+	+
	<b>Energieeffizienz</b>	-/-	+	~	—	-/-
	<b>Kostenvorteil</b>	steigend	+	—	—	~
	<b>Technologielevel</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Material/ Aufgaben</b>	Aufgaben: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alternative Sammelsysteme</li> <li>• Automatisches Sortieren</li> </ul>	Alle Materialien	Kunststofffasern wie z. B. PES und PA mit hohem Reinheitsgrad	Abhängig vom gewählten Prozess	Abhängig vom gewählten Prozess	Aufgaben: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fokus auf Design for Recycling</li> <li>• Hochwertige Produktgestaltung</li> </ul>

Für chemische Verfahren sind die textilen Faserkennwerte, wie z. B. die Faserlänge, als Eingangsgröße für den Recyclingprozess und das Ergebnis zwar irrelevant, allerdings erfordert die Verspinnung hochqualitativer und vor allem feinerer Fasern häufig eine sehr kostenaufwendige Nachpolymerisierung des Rezyklats.

Ein scheinbar großer Nachteil bei den derzeit angewandten mechanischen Prozessen ist die Faserlängeneinkürzung, die das nachfolgende Ausspinnen der Fasern zu Garnen erschwert, bzw. unmöglich macht und somit ein mechanisches Recycling vermeintlich nicht kreislauffähig erscheint. Daher ist die Überlegung einer stufenartigen Recyclingroute sinnvoll. In Abbildung 6-5 wird ein möglicher Weg aufgezeigt. Solange die Qualität der Rückfasern zur Weiterverarbeitung über den mechanischen Weg ausreichend ist, sollte dieser aufgrund von Kosten- und Energieeffizienz verfolgt werden.

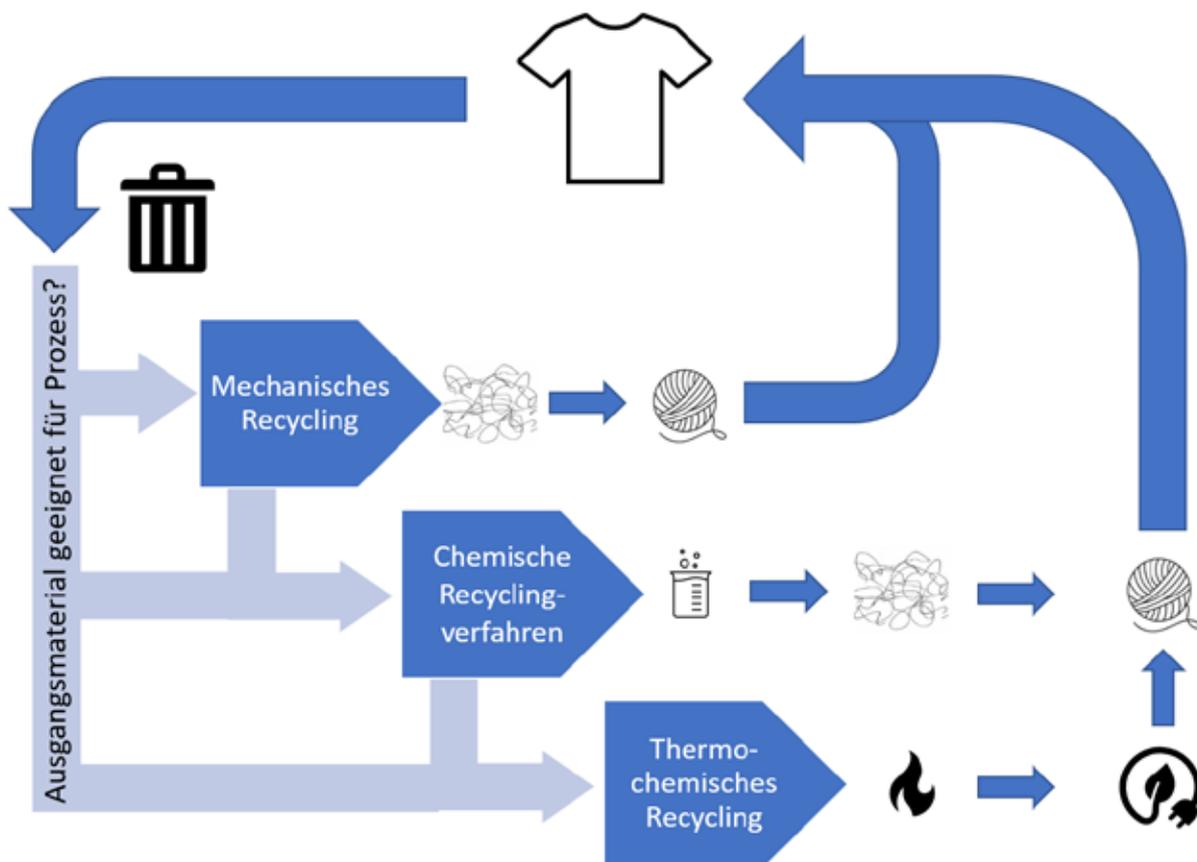


Abbildung 6-5: Entscheidungswege der Recyclingrouten

Um die Produktionsprozesse bei der Garnherstellung stabil zu gestalten, werden aktuell den rezyklierten Fasern in der Spinnereivorbereitung längere Frischfasern zugemischt, um ausspinnbare Faserbänder zu generieren. Je nach Zumischung der Primärfasern verschiebt sich dann die Kostenstruktur in der Herstellung des Recyclinggarns zu Gunsten eines vergleichbaren Garns aus Frischfasern, was hinderlich für die Akzeptanz von rezyklierten Textilien bei den

Konsumenten sein kann. Der Unterschied in der Verarbeitungskette von Rückfasern aus Pre- und Post-Consumer Textilien im Vergleich zu Frischfasern besteht in den verschiedenen Routen bis zu dem Prozessschritt der Spinnereivorbereitung. Ab diesem Schritt entspricht die Abfolge der Produktionsschritte einander. Veränderte Laufeigenschaften der Sekundärfasern im Spinnprozess und auch in der weiterführenden Flächenverarbeitung, wie der Weberei und Maschenwarenherstellung, könnten sich noch auf den Preis auswirken. Dieser Einfluss im Bereich der Flächenherstellung sollte allerdings aus heutiger Sicht vernachlässigbar sein. Einbußen beim Maschinennutzen sind im Bereich der Spinnerei und deren Vorbereitungsprozesse, aufgrund veränderter Oberflächenstrukturen der recycelten Fasern im Vergleich zu Frischfasern, zu sehen. Weitere Kosten können bei der Ausrüstung und dem Färben entstehen. Fasern aus Alttextilien haben bereits Veredlungsprozesse durchlaufen und verändern dadurch u. a. auch ihr Färbeverhalten.

Ein Rechenbeispiel in Tabelle 6-8 zeigt wie sich diese Einflussfaktoren auf die Garnkosten niederschlagen. Als Beispiel wurde Baumwolle als Rohmaterial gewählt, da sie als Sekundärfaser heute meist mit dem mechanischen Recycling assoziiert wird und die am häufigsten eingesetzte Naturfaser für Bekleidungstextilien ist. Des Weiteren diente als Basis für die Berechnung der einzelnen Prozessschritte ein Ringgarn der Feinheit Nm 40 (1g/40m) mit mittlerer Drehung. Ein beachtlicher Einflussfaktor auf den Preis für Recyclinggarne sind die Kosten für das gerissene Sekundärmaterial, das in Konkurrenz zur Neu-Baumwolle steht. Die Preisentwicklung für gerissenes Material ist sehr schwankend und setzt sich aus den Kosten für das Sammeln, Sortieren und Reißen zusammen.

Die Branche für das Sammeln und Sortieren ist wie die Textilbranche sehr fragmentiert mit vielen Akteuren und die Preise aufgrund der Logistik abhängig von den Energiekosten. Derzeit schwanken die Preise für gerissene Baumwollfasern zwischen 0,60 € bis 1,50 € pro kg [Altex, 2022], abhängig vom Reißgrad und der Reinheit des Materials. Bei einem Einstandspreis von 1,50 €/kg für die Baumwollreißfasern entsprechen die Garnkosten, inkl. der Einberechnung von Produktionseinbußen, für Ringgarne aus Sekundärfasern derer für Ringgarne aus Frischfasern. Werden für Reißfasern ein Preis von 1,00 €/kg angenommen, beeinflusst das die Garnkosten zum Vorteil der Sekundärfasern. Vorausgesetzt die Prozesse sind entsprechend angepasst und optimiert. Ein Ringgarn aus 100% Sekundärbaumwolle zu spinnen wird im industriellen Maßstab aktuell nicht praktiziert. Die Rechnung ist daher nur beispielhaft.

Tabelle 6-8: Rechenbeispiel Garnkosten aus Primär- und Sekundärbaumwollfasern [ITA, 2022]

Prozessstufe (Ringgarnherstellung)		Primär- faser	Kosten [€/kg]	Sekundär- faser	Kosten [€/kg]	Differenz [€/kg]
Material	Rohmaterial	✓	2,10	✓	1,00 (gemittelter Wert)	1,10
	Sortierung	x		✓		
	Reißen	x		✓		
Spinnereivorbereitung		✓	0,58	✓	0,87	-0,29
Spinnerei, inkl. Spulerei		✓	0,98	✓	1,36	-0,38
<b>Gesamtkosten</b>			<b>Σ 3,66</b>		<b>Σ 3,23</b>	<b>Σ 0,43</b>

Der Effekt auf die Kostensituation bezüglich Herstellkosten kann auch kalkulatorisch abgeschätzt werden. Unter der Annahme, dass die Rohstoffkosten beim Spinnen ca. 50% ausmachen, ergibt sich zunächst ein erhebliches Einsparpotenzial durch Sekundärrohstoffe, was eine Reduzierung der Garnkosten um 15% bis 20% ausmachen würde. [RohKla, 2022]

Die reale Einsparung hängt in erheblichem Maße von der Art und dem Einsatz des hergestellten Produktes (Ring-, Rotorgarn, Web- oder Strickware, etc.) ab. Bestimmende Faktoren sind die notwendigen zusätzlichen Aufwendungen durch das Recycling selbst bzw. auftretende Störfaktoren. Beispiele hierfür sind die Kosten für Sammeln und Sortieren, für Färben und Entfärben, Datenverfolgung der Eigenschaftswerte sowie Kosten für die Zumischung von Originalmaterialien.

Vor dem Hintergrund einer möglichen Einführung von Umweltprämien, analog den Subventionen von E-Fahrzeugen, für die Verarbeitung von rezyklierten Fasern in Bekleidungstextilien, berechnet die Studie der McKinsey & Company, Inc. „*Scaling textile recycling in Europe – turning waste into value*“ in einem Szenario, dass der Anteil der Faserkosten nur 3% bis 5% des Einzelhandelsverkaufspreis von Bekleidungstextilien beträgt. Deswegen sind Umweltprämien als langfristige Lösung nicht erforderlich und spielen, wenn nur, als kurzfristige Übergangsfinanzierung der textilen Recyclingindustrie eine Rolle. Allerdings führt McKinsey andere Argumente für die Einführung von Umweltprämien an. Die Verfügbarkeit von brauchbaren Sekundärfasern könnte sich bis ins Jahr 2030 um 60% bis 70% verknappen, was sich negativ auf den Sekundärrohstoffpreis auswirken und somit durch Prämiensysteme ausgeglichen werden könnte. Allerdings ist der Anteil der Faserkosten am Verkaufspreis eher gering. Ein möglicher Preisanstieg des Rohmaterials um 25% hat lediglich bei bestimmten Produkten eine Erhöhung des Einzelhandelspreises von nur 3% zur Folge. Des Weiteren argumentiert

McKinsey mit der wachsenden Bereitschaft der Kunden bis zu 15% Preisaufschlag für Umweltprämien für nachhaltige, recycelte Ware zu zahlen. [McKinsey, 2022]

Die aktuellen Prozesse zur Garnherstellung sind spezifisch auf den Rohstoff Neu-Baumwolle optimiert und müssen zunächst auch für die Verarbeitung von rezyklierten Fasern untersucht und angepasst werden. Diese Prozesse können durch gezielte Forschung und Entwicklung optimiert werden. Die Kosten für Garne aus Rückfasern können sich durch gezielte Investitionen zu Gunsten des Textilrecyclings entwickeln.

## 6.6 Bedeutung des Textilrecyclings für Bayern

Die Produktion und Herstellung der klassischen Rohstoffe für Textil- und Bekleidung wie Baumwoll- und Polyesterfasern liegen nicht in Bayern und sind global stark vernetzt. Die McKinsey Studie geht davon aus, dass allein die Produktion von Mode weltweit für 3 bis 10% der globalen Treibhausmissionen verantwortlich ist. [McKinsey, 2022]

Nachhaltigkeit ist daher sowohl in der Produktgestaltung von Textilien als auch in Hinblick auf die Ökologie der gesamten textilen Kette, von der Produktion, über die Nutzung bis hin zur Entsorgung der textilen Produkte, das entscheidende Element. Das wachsende Problem der Altkleider ist nicht nur medial stark präsent, sondern auch Schwerpunkt vieler Initiativen seitens der EU und der Länder. Neben dem geänderten Kaufverhalten fordern und fördern auch die gesetzlichen Regelungen die Konvertierung der textilen Herstellungsketten in nachhaltigere und kreislauffähige Produkte. Die 5-stufige Abfallhierarchie der EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/ stellt dazu eine klare Rangfolge im Umgang mit Abfällen dar. Vorrangig müssen Abfälle vermieden werden. Ist eine Vermeidung nicht möglich, müssen sie erst verwertet werden, bevor sie final entsorgt werden. Folglich müssen zur Vorbereitung der textilen Recyclingprozesse gemäß dieser Richtlinie Textilien ab 2025 europaweit getrennt erfasst werden.

Auf Basis des Green Deal der EU rückt das Textilrecycling vermehrt in den Vordergrund, um das wachsende Aufkommen an Textilabfall zu verwerten. So hat die EU sowohl die geplanten Maßnahmen als auch den Zeitplan detailliert und mit der „EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles“, der sogenannten Textil-Agenda [EUStrat 2022, EUAn 2022, EUSyn 2022] eine sehr schnelle und umfassende Umsetzungsplanung für alle in die Herstellung und den Handel mit Textilien involvierten Unternehmen vorgegeben. In den Dokumenten werden langlebige und recyclebare textile Produkte gefordert, die frei von gefährlichen Inhaltstoffen sind und in der Produktion den Respekt der sozialen wie auch der Umweltaspekte berücksichtigen. Die Dokumente bauen auf der Abfallhierarchie auf und fordern die klare Einhaltung der Reihenfolge der Verwertungsprinzipien. Demnach muss zunächst das Potenzial der Verwertung durch Reparatur, Wiederbenutzung und Handel mit textilen Sekundärmaterialien erschöpft

sein, bevor eine Verwertung durch Recycling realisiert werden kann. Beim Recycling legt die Abfallhierarchie eindeutig fest, dass werkstoffliches dem rohstofflichen Recycling vorzuziehen ist.

Durch Wiederverwerten der Produkte und Rückführung als Sekundärrohstoffe können Kreisläufe geschlossen und der Verbrauch an Treibhausgasen durch mechanisches Recycling um 80 bis 90% bei Baumwolle und um 85 bis 95% bei Polyester reduziert werden [Higg2019].

Erhebliche Mengen von Textilien in Bayern werden zu Alttextilien, von denen der Hauptteil auf importierten Materialien beruht. Eine Frage ist, ob ein möglicher positiver Wettbewerbsimpuls erreicht werden könnte, wenn auf Basis von Alttextilien wieder inländische Rohstoffe zur Verfügung stehen würden.

Die Beantwortung dieser Frage hängt im Wesentlichen davon ab, ob es gelingt, Sekundärrohstoffe aus Alttextilien zu wettbewerbsfähigen Produkten zu verarbeiten und eine Kostenstruktur zu schaffen, die zumindest kostenneutral wettbewerbsfähige Produkte erzeugen kann.

So sind Alttextilien nicht nur als Abfall zu sehen, sondern als inländische Quelle für Sekundärrohstoffe.

Durch das Sammeln und Sortieren, sowie die Wiederaufbereitung von Faserrohstoffen aus Alttextilien wird der Rohstoff für die Textil- und Bekleidungsindustrie regional verfügbar. Sowohl die Herstellung von Textilien als auch die dafür eingesetzten Materialien sind vielfältig. Ebenso ist die Textilindustrie in ihrer gesamten Wertschöpfungskette sehr fragmentiert.

Einflüsse ökologischer Vorteile einer Produktion vor Ort, sowie der Anstieg bei internationalen Logistikkosten können sich positiv auf die Kostenstruktur inländischer Produktion auswirken und eine Chance sein, die abgewanderte Textilindustrie aus Asien zurückzuholen.

Hier kann auch die bayerische Textilindustrie wegen der vorgegebenen Randbedingungen (weniger Logistik, CO<sub>2</sub>-Bilanz, Umwelteffekte) wieder neue Geschäftsfelder besetzen.

McKinsey stellt in der weiter oben genannten Studie auch ein Wirtschaftsszenario vor, welches bis 2030 von 15.000 neuen Arbeitsplätzen in der Textilrecyclingbranche in Europa ausgeht. Dabei stellt die Unternehmensberatung ökologische, soziale und wirtschaftliche Wertschöpfungsmöglichkeiten in dem Bereich vor. Für die 27-EU Staaten und der Schweiz wird ein Gewinnpotential von 1,5 Mrd. bis 2,2 Mrd. Euro errechnet und von einer CO<sub>2</sub>-Einsparung von bis zu 4,3 Mio. Tonnen ausgegangen. Die Investitionen dafür belaufen sich europaweit auf 6 bis 7 Mrd. Euro. Zur Steigerung der Rendite, nimmt in dieser Beispielrechnung die lokale Produktion von Rezyklatfasern eine Schlüsselrolle ein. [McKinsey,2022]

Mit ausgewählten Investitionen und Bereitstellung geeigneter Infrastruktur könnte Bayern an diesem Szenario partizipieren und von der wachsenden Branche profitieren.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass die verstärkte Nutzung von recycelten Sekundärmaterialien große Chancen für die bayerische Textilindustrie beinhaltet. Der traditionsreiche Wirtschaftssektor hat die Möglichkeit eine Vorreiterstellung im Textilrecycling einzunehmen und einen deutlichen Zuwachs von Umsatz, Mitarbeiterzahlen und Marge zu generieren.

## 7 Mengenpotenzial von Wasserstoff aus Textilabfällen

### 7.1 Zukünftiger Wasserstoffbedarf in Bayern

Deutschlandweit liegt der aktuelle jährliche Wasserstoffverbrauch bei ca. 1,7 Mio. t oder 55 TWh (Umrechnung über Heizwert). Wasserstoff wird in erster Linie für stoffliche Herstellungsverfahren in der Industrie verwendet. Dazu gehören etwa in gleichen Teilen die Grundstoffchemie und die Petrochemie. In der Grundstoffchemie wird Wasserstoff in erster Linie für die Ammoniaksynthese und die Methanolherstellung verwendet. Der Großteil des verwendeten Wasserstoffs wird aus fossilen Quellen gewonnen. In Deutschland wurde 2015 ca. 45% aus Rohöl, 33% aus Erdgas und 15% aus Kohle erzeugt [jwd, 2019]. Ca. 7% werden über Elektrolyseverfahren hergestellt. [BMW, 2020]

Als Ersatz für fossile Energieträger wird grüner Wasserstoff in vielen Bereichen als essentiell zum Erreichen von Klimaschutzziele angesehen. So sieht die bayerische Wasserstoffstrategie Wasserstoff als zentrales Schlüsselement zur Sektorkopplung, mit dessen Hilfe erneuerbare Energien auch in Sektoren Einzug finden können, die sich nicht oder nur schwer elektrifizieren lassen. Dazu zählen z. B. der Schwerlast-, Schiffs- und Flugverkehr sowie die Stahlindustrie [StMW, 2020]. Im Zuge der Reduktion der Verwendung von fossilen Energieträgern wird der Wasserstoffbedarf voraussichtlich stark ansteigen. Wasserstoff soll dabei hauptsächlich

- als Energieträger und -speicher,
- zur Sektorkopplung und
- als Grundstoff in der chemischen Industrie

eingesetzt werden.

Der zukünftige Bedarf ist von vielen Faktoren abhängig, u. a. von der weiteren Entwicklung und Etablierung von Technologien wie Elektrolyse und Stromspeicher, einem zukünftigen Wasserstoff-Pipelinennetz sowie von Marktpreisen und geopolitischen Entwicklungen. Mehrere Studien der letzten Jahre prognostizieren den zukünftigen Wasserstoffbedarf. Folgend werden zwei Studien genauer betrachtet:

- „Klimaneutrales Deutschland“ von Prognos, Öko-Institut und Wuppertal-Institut, im Auftrag der Agora aus dem Jahr 2020
- „Wege für die Energiewende - Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050“ des Forschungszentrum Jülich aus dem Jahr 2020

Die Studien wurden aufgrund ihrer guten Datenbasis hinsichtlich Sektorenbedarf und zeitlicher Entwicklung ausgewählt.

Abbildung 7-1 stellt den prognostizierten Wasserstoffbedarf der beiden Studien gegenüber. Nach beiden Studien steigt der Wasserstoffbedarf in Deutschland bis 2050 stark an.

Aus dem Mittelwert der beiden Studien und dem Anteil Bayerns am nationalen Bruttoinlandsprodukt (18,5% im Jahr 2021 [statistik bayern, 2022]) lässt sich ein zukünftiger Wasserstoffbedarf in Bayern prognostizieren (Tabelle 7-2).

Die Sektoren Energie (37%), Industrie (31%) und Verkehr (28%) stellen dabei den größten Bedarf. Der Sektor Gebäude (4%) spielt eine untergeordnete Rolle. Der gesamte anzunehmende Wasserstoffbedarf für Bayern steigt von 10 TWh/a im Jahr 2030 auf 61 TWh/a im Jahr 2050. Dies liegt im unteren Bereich des Werts der bayerischen Wasserstoffstrategie, die für 2050 einen Wasserstoffbedarf von 60 bis 100 TWh prognostiziert. Weil begrenzten Verfügbarkeit erneuerbarer Energien müsse ein großer Teil des in Deutschland benötigten Wasserstoffs importiert werden. [BMW, 2020]

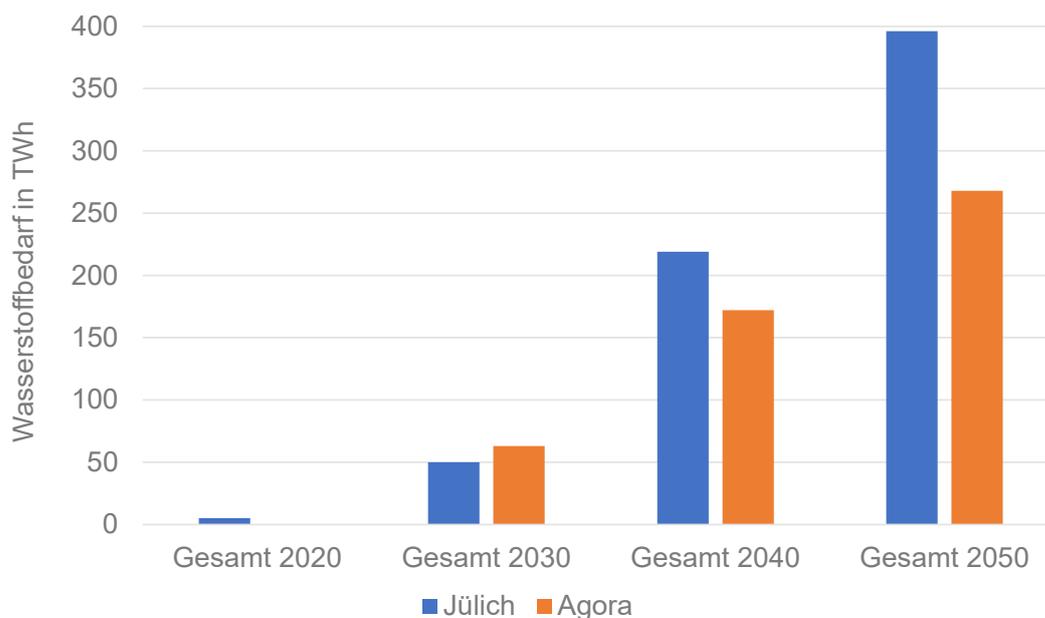


Abbildung 7-1: Nationaler Wasserstoffbedarf in TWh für die Sektoren Energie, Gebäude, Industrie und Verkehr nach Studien vom Forschungszentrum Jülich (2020) und von Agora (2021)

Tabelle 7-1: Prognose des Wasserstoffbedarfs in Bayern in TWh/a

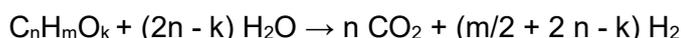
	2030	2040	2050
Energie	2,1	14,6	22,8
Gebäude	0,09	0,8	2,5
Industrie	5,9	9,2	19
Verkehr	2,3	11,6	17
<b>Gesamt</b>	<b>10</b>	<b>36</b>	<b>61</b>

## 7.2 Theoretisches Wasserstoffpotenzial von Textilabfällen

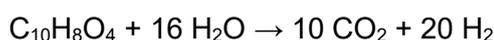
Als theoretisches Potenzial wird nachfolgend die Wasserstoffmasse bestimmt, die sich aus einer vollständigen Nutzung von verfügbaren Textilabfällen zur Wasserstoffherzeugung ergäbe. Hierfür werden zuerst stöchiometrische materialspezifische Wasserstoffausbeuten bestimmt. Textilabfälle bestehen zum Großteil aus Polyester (15%) und Baumwolle (47%) oder eine Mischung aus beiden Stoffen (12%). Andere natürliche und künstlichen Fasern machen rund 25% der Masse aus (vgl. AP4). Zwei Verfahrenswege zur Wasserstoffgewinnung kommen in Betracht:

- Zum einen können Textilabfälle zunächst in einer Abfallverbrennungsanlage zu Strom und Wärme umgesetzt werden; anschließend wird mit dem erzeugten elektrischen Strom mittels Elektrolyse Wasserstoff hergestellt.
- Zum anderen kann Wasserstoff aus kohlenstoffhaltigen Materialien thermochemisch gewonnen werden. Eine Studie des bifa Umweltinstituts zur Gewinnung von Wasserstoff aus Gewerbeabfällen, die beide Wege vergleichend bewertet, kam zu dem Schluss, dass die thermochemische Umsetzung aufgrund des höheren Wirkungsgrads zu bevorzugen ist und in der Regel ökobilanziell günstiger ist [bifa, 2022].

Daher wird folgend die thermochemische Umsetzung (Vergasung) betrachtet. Um das stöchiometrische Potenzial der thermochemischen Wasserstoffherzeugung aus Kohlenstoffverbindungen ( $C_nH_mO_k$ ) abzuschätzen, kann vereinfachend folgende Reaktionsgleichung für eine vollständige Umsetzung angenommen werden [Czernik, 2006].



Damit ergibt sich für die Umsetzung eines Polyesters, hier am Beispiel von Polyethylterephthalat (PET):



Für die Umsetzung von Baumwolle (Cellulose) ergibt sich:



Über die molaren Massen lässt sich damit das stöchiometrisch-theoretische Wasserstoffpotenzial berechnen. Tabelle 7-2 zeigt dieses für verschiedene Textilfasern. Das größte Potenzial unter den Textilmaterialien hat Polyacrylnitril (PAN) mit 300 kg/t, das niedrigste Baumwolle mit 150 kg/t. Für die proteinbasierten Textilien, die keine einheitliche chemische Zusammensetzung haben, erfolgt eine Abschätzung über den Heizwert von Baumwolle.

Tabelle 7-2: Theoretisches Potenzial verschiedener Textilfasern

	<b>Wasserstoffpotenzial in kg/t</b>	<b>Bemerkung</b>
PAN	300	Abschätzung über Reaktionsgleichung
PA + PA/BW	290	Abschätzung über Reaktionsgleichung (reines PA)
PES	210	Abschätzung über Reaktionsgleichung
proteinbasiert	180	Abschätzung über Heizwert
PES/BW	180	Annahme 50% Baumwolle, 50% PES
sonst. Mischgewebe	180	Annahme: identisch zu PES/BW-Gemisch
Baumwolle	150	Abschätzung über Reaktionsgleichung
Restabfall	64	Abschätzung über Heizwert

Die Werte stellen ein stöchiometrisch-theoretisches Potenzial bei einer Vergasung mit Wasserdampf dar. Mit den Sortierergebnissen aus Abschnitt 5 ergibt sich für Abfälle aus der gewerblichen Sammlung von Alttextilien ein theoretisches Potenzial von 160 kg/t. Realistische Wasserstoffausbeuten über den gesamten Prozess inklusive Gasaufbereitung bei Vergasungsprozessen ohne externe Wärmezufuhr liegen bei ca. 50% des stöchiometrischen Potenzials [vgl. z. B. Iribarren, 2014]. Damit ist für trockene Textilabfällen mit einer Wasserstoffausbeute über den gesamten Prozess von ca. 80 g/kg zu rechnen.

Die potenzielle textile Abfallmenge für die Umsetzung zu Wasserstoff in Bayern liegt bei 116.000 t/a. Damit ergibt sich ein theoretisches Potenzial von 9.300 t/a (0,3 TWh/a) Wasserstoff aus Textilabfällen in Bayern. Werden die aktuell tatsächlich verfügbaren 70.000 t/a in Bayern angesetzt, resultiert ein Wasserstoffpotenzial von 5.600 t/a (0,19 TWh/a).

### 7.3 Produktionskosten für die Wasserstoffherzeugung

Der Kosten für die Herstellung von Wasserstoff für das Jahr 2019 und der Kostentrends für die Jahre 2030 und 2050 sind in Abbildung 7-2 dargestellt [Bukold, 2022]. Die Kosten für grauen Wasserstoff lagen im Jahr 2019 bei 4,5 ct/kWh. Dies entspricht ca. 1,50 € pro kg Wasserstoff. Mit steigenden Zertifikatpreisen im EU-Emissionshandel (Annahme hier: 100 €/t CO<sub>2</sub>) ist bis 2030 jedoch selbst bei stabilen Erdgaspreisen mit einem Anstieg der Produktionskosten zu rechnen. Für 2050 wurde darüber hinaus eine Carbon Import Tax von 100 €/t CO<sub>2</sub> angenommen, was zu einem weiteren Anstieg der Produktionskosten für grauen Wasserstoff führt. Auch für blauen Wasserstoff wird hier mit einer leichten Preiserhöhung für 2030 und 2050 gerechnet. Für grünen Wasserstoff wird mit einer deutlichen Reduzierung der Gestehungskosten gerechnet, so dass spätestens 2050 je nach Preisentwicklung der Elektrolyseure abzusehen ist, dass die Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien konkurrenzfähig zur Erzeugung aus fossilen Ressourcen ist. Treiber der Preissenkung für grünen Wasserstoff sind vor allem Skaleneffekte bei der industriellen Produktion der Elektrolyseurkomponenten, größere Anlagensysteme und weiter sinkende Gestehungskosten für regenerativ erzeugten Strom [STMWi, 2020].

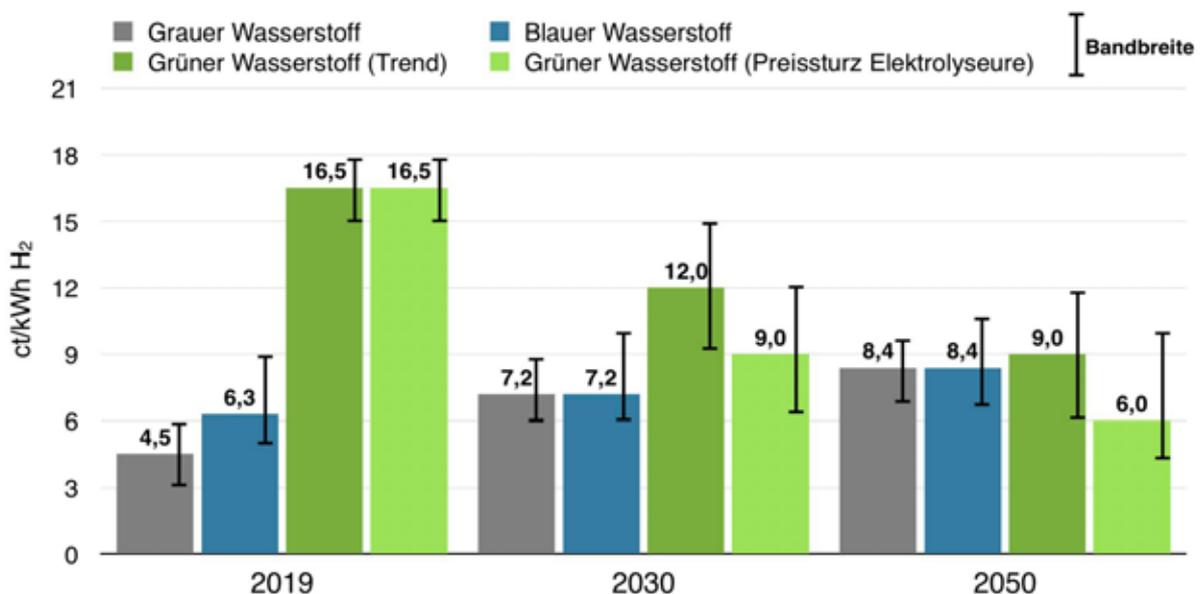


Abbildung 7-2: Produktion von Wasserstoff: Kosten und Kostentrends [Bukold, 2020]

Wasserstoff wird im öffentlichen Diskurs je nach Ausgangsprodukt und Nebenprodukten verbreitet durch Farben charakterisiert. Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen, bei denen CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre freigesetzt wird bezeichnet man als grauen Wasserstoff. Wird das CO<sub>2</sub> stattdessen gespeichert, spricht man vom blauen Wasserstoff. Wasser kann mittels Elektrolyse zu

Wasserstoff und Sauerstoff gespalten werden. Wird dabei regenerative Energie eingesetzt, spricht man von grünem Wasserstoff. Wird statt regenerativen Energien, Energie aus Müllheizkraftwerken oder Biogas verwendet spricht man oft von orangenem Wasserstoff. Als türkisen Wasserstoff bezeichnet man Wasserstoff aus der Methanpyrolyse. Statt CO<sub>2</sub> entsteht dabei fester Kohlenstoff. Die wichtigsten farblichen Charakterisierungen, ihre Ausgangsstoffe, und die Art der Energiebereitstellung sind in Abbildung 7-3 dargestellt.

Welcher Preis für Wasserstoff aus Textilabfällen erzielt werden kann, hängt auch von der zukünftigen rechtlichen und marktlichen Einstufung des so gewonnen Wasserstoffs ab.

Eine Einstufung als grüner Wasserstoff erscheint aufgrund des hohen Anteils an fossilem Kohlenstoff in Textilabfällen nicht realistisch. Würde das bei der thermochemischen Umsetzung erzeugte CO<sub>2</sub> abgetrennt und gespeichert, wäre eine Einstufung als blauer Wasserstoff möglich. Würde das CO<sub>2</sub> freigesetzt, ist eventuell eine Einstufung als oranger Wasserstoff möglich. Abschätzungen zu den Produktionskosten von Wasserstoff aus Abfällen mittels Vergasung lagen für 2019 bei 1,3 bis 4,4 €/kg (3,8 bis 13,1 €/kWh) [Shahabuddin, 2019, umgerechnet mit 0,91 €/USD]. Eventuell ist auch eine anteilige Einstufung als grüner Wasserstoff korrelierend zum biogenen Anteil möglich. Der biogene Anteil der Textilabfälle beträgt laut Sortieranalyse (siehe Abschnitt 0) ca. 60%.



Abbildung 7-3: Aufteilung des Wasserstoffs nach „Farben“

## 7.4 Bewertung des Wasserstoffpotentials von Textilabfällen

Aktuell wird Wasserstoff hauptsächlich aus fossilen Quellen gewonnen. Soll die Dekarbonisierung der Energiewirtschaft umgesetzt werden, gewinnt die Erzeugung von Wasserstoff aus alternativen Quellen zunehmend an Bedeutung. Im Wesentlichen wird dabei die Erzeugung mittels Elektrolyse aus erneuerbaren Energien (Solar und Wind) angestrebt. Da Wasserstoff in vielen Punkten auch als Alternative zu fossilen Treibstoffen angesehen wird, kann mit einem zukünftig stark wachsenden Bedarf gerechnet werden.

Man kann davon ausgehen, dass Deutschland einen Großteil des Wasserstoffs zukünftig importieren muss. Mit den in Bayern anfallenden Textilabfällen könnten ca. 5.600 t/a Wasserstoff im Jahr erzeugt werden. Bezogen auf den prognostizierten Bedarf von 300.000 t/a im Jahr 2030 kann die Textilvergasung damit nur einen geringen Beitrag von rund 2% zur zukünftigen Wasserstoffherzeugung leisten. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass zu erwarten ist, dass die nächsten Jahre nicht mit einer starken Abnahme der Textilabfälle zu rechnen ist. Eine hochwertige Verwertung der nicht stofflich recyclingbaren Textilabfälle ist daher in den nächsten Jahrzehnten notwendig. Darüber hinaus können Anlagen die Textilabfälle verwerten auch andere Abfälle mit ähnlichen Zusammensetzungen wie z. B. Kunststoffabfälle und organische Abfälle (z. B. Reste aus der Papierindustrie) verwerten wodurch sich das Potenzial erhöhen kann. Die thermochemische Umsetzung von Textilabfällen kann einen Beitrag dazu leisten Wasserstoff aus heimischen Ressourcen zu gewinnen. Ein wirtschaftlicher Betrieb einer Vergasungsanlage für Textilabfall ist realistisch hängt aber von den Rahmenbedingungen ab und muss im Einzelfall geprüft werden. Chancen und Leitlinien der Umsetzung können dabei im Einzelnen sein:

- Die Vergasung kann die bestehende Textilabfallentsorgung als alternativen Verwertungsweg ergänzen.
- Das Effizienzniveau und die Wirtschaftlichkeit einer Abfallvergasung können erheblich höher liegen, wenn in der Folgeanwendung Synthesegas oder wenig aufgereinigter Wasserstoff anstelle eines Wasserstoff-Reingases ausreichen. Dies kann etwa bei einer Methanolsynthese oder bei Fischer-Tropsch-Synthesen zum Tragen kommen, die auch den Kohlenstoffanteil im Synthesegas benötigen, oder beim Stahl-Hochofenprozess.
- Um die Effizienz zu erhöhen, müsst damit eine Vergasungsanlage bestenfalls in räumlicher Nähe zur abnehmenden Anlage stehen
- Große Wasserstoffabnehmer können Initiatoren der Umsetzung von Vergasungsanlagen sein.

- Integriert sollten CCS und CCU betrachtet werden (CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung, CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Verwendung).
- Aufgrund der technischen Komplexität einer Vergasungsanlage ist eher von zentralen größeren Anlagen als von dezentralen Kleinanlagen auszugehen. Realisierte Anlagen arbeiten mit Einsatzmengen im Bereich 15.000 bis 200.000 t/a.
- Eine CO-Vergasung mit anderen Abfällen kann die Wirtschaftlichkeit verbessern und die Versorgungssicherheit mit Inputmaterial erhöhen.

Haupteinnahmequelle einer Vergasungsanlage stellt der Verkauf des Wasserstoffs dar. Die erreichbaren Erlöse aus dem Verkauf des Wasserstoffs sind derzeit nur schwer abzuschätzen und hängen unter anderem von folgenden Punkten ab:

- Preisentwicklung CO<sub>2</sub>
- Preisentwicklung Wasserstoff
- Preisentwicklung von Elektrolyseuren
- Preisentwicklung fossiler Treibstoffe
- Zukünftiger Wasserstoffbedarf
- Ausbau der erneuerbaren Energien
- Entwicklung der CCS- CCU-Technologie
- Globale Entwicklungen und internationale Beziehungen (Import von Wasserstoff)

## 8 Analyse von Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff aus Textilien

### 8.1 Begriffsbestimmung

Bei der **Verbrennung** wird zur vollständigen Oxidation überstöchiometrisch Sauerstoff zugeführt. Sie kommt in der Regel bei der Wärme- und Stromerzeugung aus Brennstoffen zum Einsatz.

Die Pyrolyse und Vergasung zählen zu den thermochemischen Verfahren. Produkte aus Pyrolyse oder Vergasung (Öl und Gas) können im Gegensatz zu den Reststoffen aus Verbrennungsprozessen nach einer Aufbereitung und Reinigung zu chemischen Zwischenprodukten und damit als Ausgangsstoffe für die chemische Industrie verwendet werden.

**Pyrolyse** findet bei 350°C bis 700°C in Abwesenheit von Sauerstoff statt. Pyrolyseverfahren werden aktuell eingesetzt, um Kunststoffabfälle in feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe umzuwandeln [Miandad, 2019]. Verfahren zur Produktion von Rohstoffen für die chemische Industrie sind ebenfalls in der Entwicklung [Pohjakallio, 2020]. Pyrolyse wird derzeit bereits kommerziell für die Wiedergewinnung von Karbonfasern verwendet [Blazsó, 2010]. Da der Fokus dieser Studie die Produktion von Wasserstoff und nicht von flüssigen Produkten ist, wird im Folgenden nicht weiter auf Pyrolyseverfahren eingegangen. Eine Pyrolyse kann jedoch als Vorstufe zur Aufbereitung der Textilabfälle für eine anschließende Vergasung dienen.

**Vergasung** ist ein thermochemischer Prozess, bei dem ein kohlenstoffhaltiger Einsatzstoff bei Temperaturen zwischen 500°C und 1.200°C in Anwesenheit eines Vergasungsmittels in ein Produktgas übergeführt wird, wobei unterstöchiometrisch Sauerstoff zugeführt wird. Hauptunterschiede zwischen den Vergasungstechnologien bestehen in

- der Zuführung von Wärme (allotherm oder autotherm),
- dem Reaktordesign (Festbettvergaser, Wirbelschichtvergaser, Flugstromvergaser, Drehrohrvergaser) und dem
- eingesetzten Vergasungsmittel (Sauerstoff, Wasserdampf).

### 8.2 Technologie und Varianten der Vergasung

Bei der autothermen Vergasung wird der Einsatzstoff mit einem oxidierenden Vergasungsmittel teiloxidiert. Die Zuführung des Oxidationsmittels erfolgt dabei unterstöchiometrisch. Die Teiloxidierung stellt die Energie für die Vergasung der restlichen Bestandteile zur Verfügung. Durch das Sauerstoff-Defizit im Reaktor erfolgt nur eine geringe Freisetzung von Furanen und

Dioxinen, die bei der Verbrennung von Abfällen oft ein Problem darstellen. Darüber hinaus werden Wärmeverluste reduziert und die Effizienz der Energierückgewinnung erhöht.

Nach der Vergasung muss das Produktgas gereinigt und aufgewertet werden. Das Produktgas besteht im Wesentlichen aus

- brennbaren Gasen wie Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid, Methan und gegebenenfalls kurzkettige Kohlenwasserstoffe,
- nicht brennbaren Gasen wie Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Stickstoff sowie
- Verunreinigungen, insbesondere Grob- und Feinpartikel, Alkalien, langkettige Kohlenwasserstoffe, Stickstoffverbindungen, Schwefelverbindungen, Kohlenstoff-Sauerstoff-Schwefel-Verbindungen und Halogenverbindungen [Kaltschmitt, 2009].

Die genaue Zusammensetzung hängt dabei von vielen Faktoren ab. Dazu gehören die Art und Menge des Vergasungsmittels, die Art der Wärmebereitstellung, die Bauart des Reaktors (Mischungsintensität, Verweilzeiten), die Vergasungstemperatur, die Druckverhältnisse im Reaktor, die Art und Form des Einsatzstoffs (z. B. Größe, spezifische Oberfläche, Feuchtigkeit, Zusammensetzung) und die Anwesenheit eines Katalysators [Kaltschmitt, 2009].

Die grundsätzlichen Verfahrensschritte sind in Abbildung 8-1 dargestellt und werden im Folgenden beschrieben. Abbildung 8-2 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Kategorisierungen der Vergasungsverfahren.

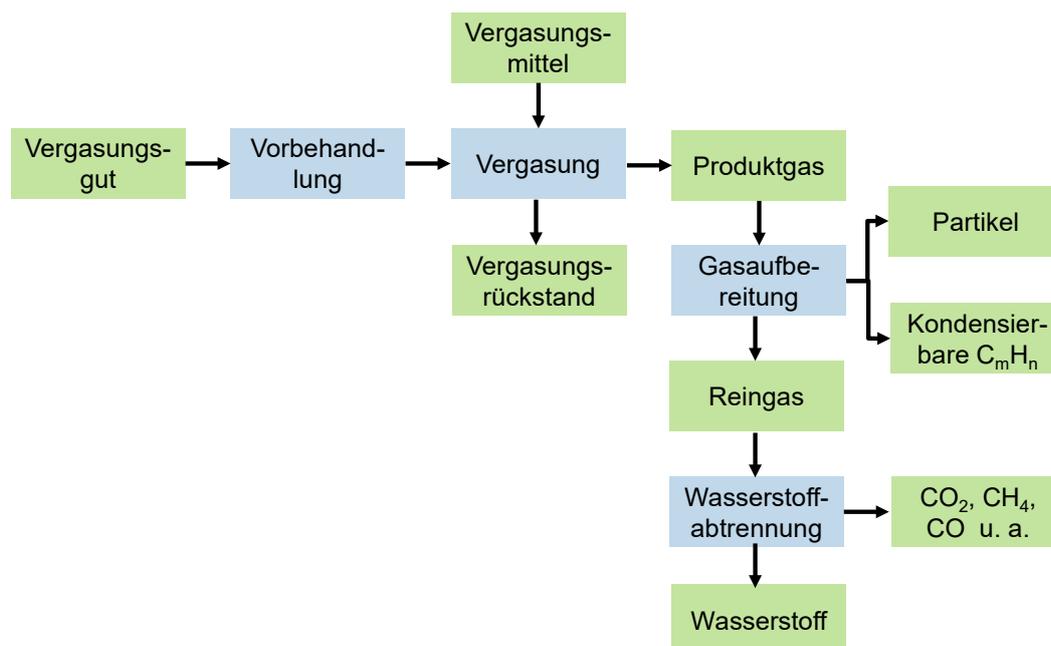


Abbildung 8-1: Allgemeiner Prozessablauf für die Produktion von Wasserstoff durch Vergasung

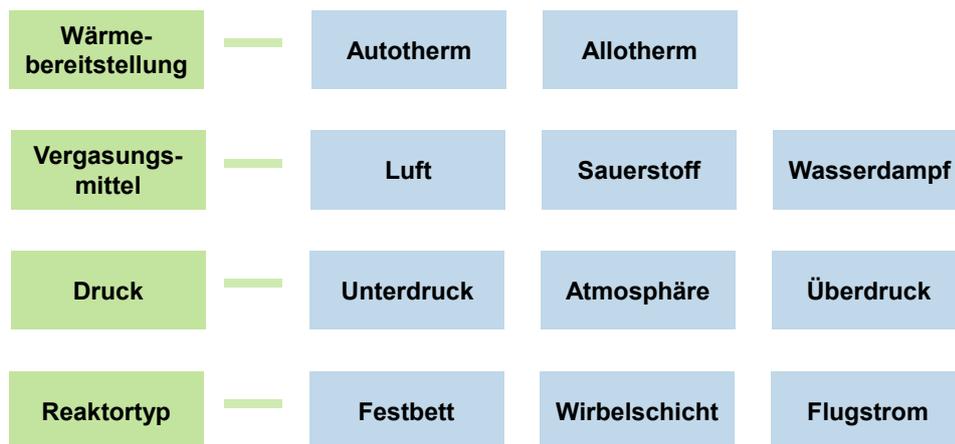


Abbildung 8-2: Einteilung der Vergasungsverfahren

Beispielhaft ist in Abbildung 8-3 ein Sankey-Diagramm der Massenbilanz eines allothermen 10 MW-Dual-Fluidized-Bed-(DFB)-Biomassevergaser dargestellt. Nach dem Vergaser wird die Wasserstoffausbeute mit Hilfe einer Wassergas-Shift-Reaktion (WGS) und einem Dampfreformierer (SR) weiter erhöht. Für die Teerabtrennung kommt ein Wäscher mit Rapsölmethyl-ester zum Einsatz. Für die Wasserstoffabtrennung wird zunächst mit Hilfe eines Monoethanolamin-Wäschers das CO<sub>2</sub> abgetrennt. Anschließend kommt eine Druckwechseladsorptions-anlage (PSA) zum Einsatz.

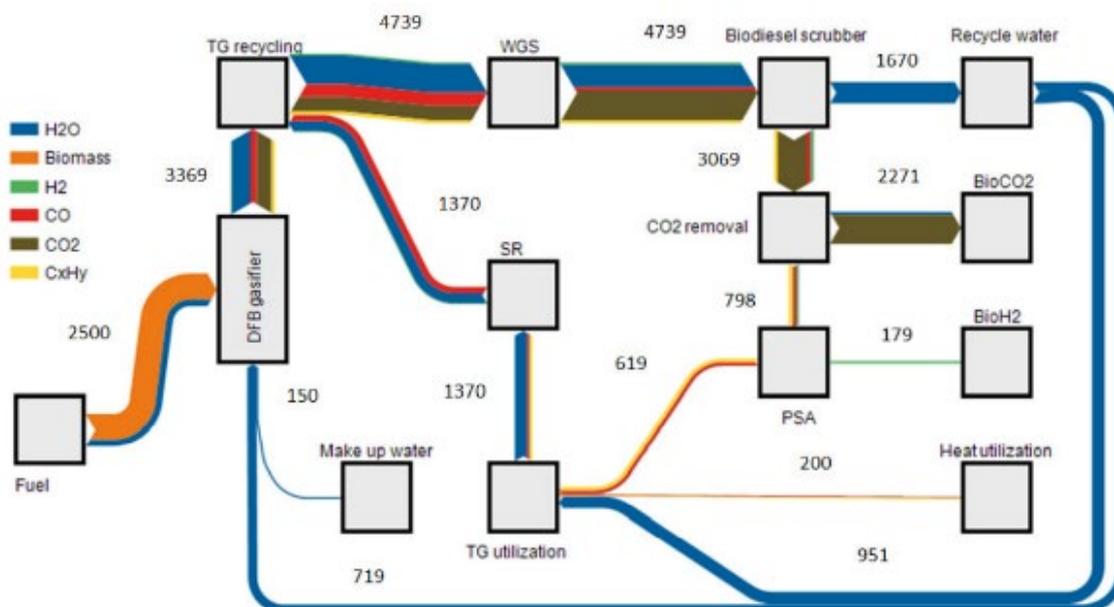
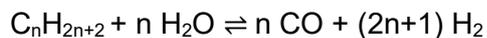
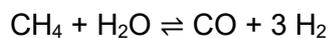


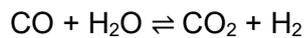
Abbildung 8-3: Sankey-Diagramm der Massenströme eines 10 MW-DFB-Vergasers; Ströme in kg/h (TG=tail gas) [Loiperböck, 2018]

Aktuell sind keine Anlagen in Betrieb, die ausschließlich Kunststoffabfälle vergasen. Es gibt jedoch Anlagen, die Kunststoff- und/oder Siedlungsabfälle einsetzen. Diese sind zumindest in Form einer Co-Vergasung auch für Textilabfälle geeignet.

Die Dampfreformierung kann als Sonderfall der Vergasung angesehen werden. Bei ihr wird Wasserdampf als Vergasungsmittel eingesetzt. Da die Reaktion organischer Stoffe mit Wasserdampf endotherm ist, muss bei einer reinen Dampfreformierung Energie zugeführt werden. Hauptreaktionsprodukte sind Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid. Das Kohlenmonoxid kann anschließend mit Wasserdampf über die Wassergas-Shift-Reaktion zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid umgesetzt werden:



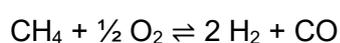
Wassergas-Shift-Reaktion:



Die **Dampfreformierung** von Erdgas (Methan,  $\text{CH}_4$ ) stellt aktuell den Hauptherstellungsweg von Wasserstoff dar. Diese findet bei Temperaturen von  $700^\circ\text{C}$  bis  $1.000^\circ\text{C}$  und 3 bis 25 bar statt [Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2022]. In der Regel werden Nickel- oder Rhodium-Katalysatoren verwendet [Schädel, 2008]. Andere mögliche Einsatzstoffe für die Dampfreformierung sind u. a. fossile Brennstoffe wie Naphta, Methanol, LPG, Propan, Butan, Diesel und Kerosin.

Textilien können entweder direkt mit Wasserdampf vergast werden. Oder sie werden in einem ersten Schritt z. B. mittels Pyrolyse umgesetzt, und die Produkte werden anschließend einer Dampfreformierung zugeführt. Da die Reaktion der Dampfreformierung endotherm ist, muss dem Prozess extern Energie zugeführt werden (vgl. allotherme Vergasung).

Als partielle Oxidation bezeichnet man die unterstöchiometrische Umsetzung eines Brennstoff-Luft/Sauerstoff-Gemisches. Dabei entsteht ein wasserstoffreiches Produktgas. Die Reaktion ist exotherm:



Die **partielle Oxidation** ist bei der Vergasung von Textilien ein Teilschritt, der zeitgleich mit weiteren Reaktionen im Vergaser stattfindet.

Beim autothermen Reformier werden die Dampfreformierung und die partielle Oxidation miteinander kombiniert. Die partielle Oxidation stellt dabei die notwendige Energie für die Dampfreformierung zur Verfügung. Die Eingliederung der thermochemischen Umsetzung und ihrer ist vereinfacht in Abbildung 8-4 dargestellt.

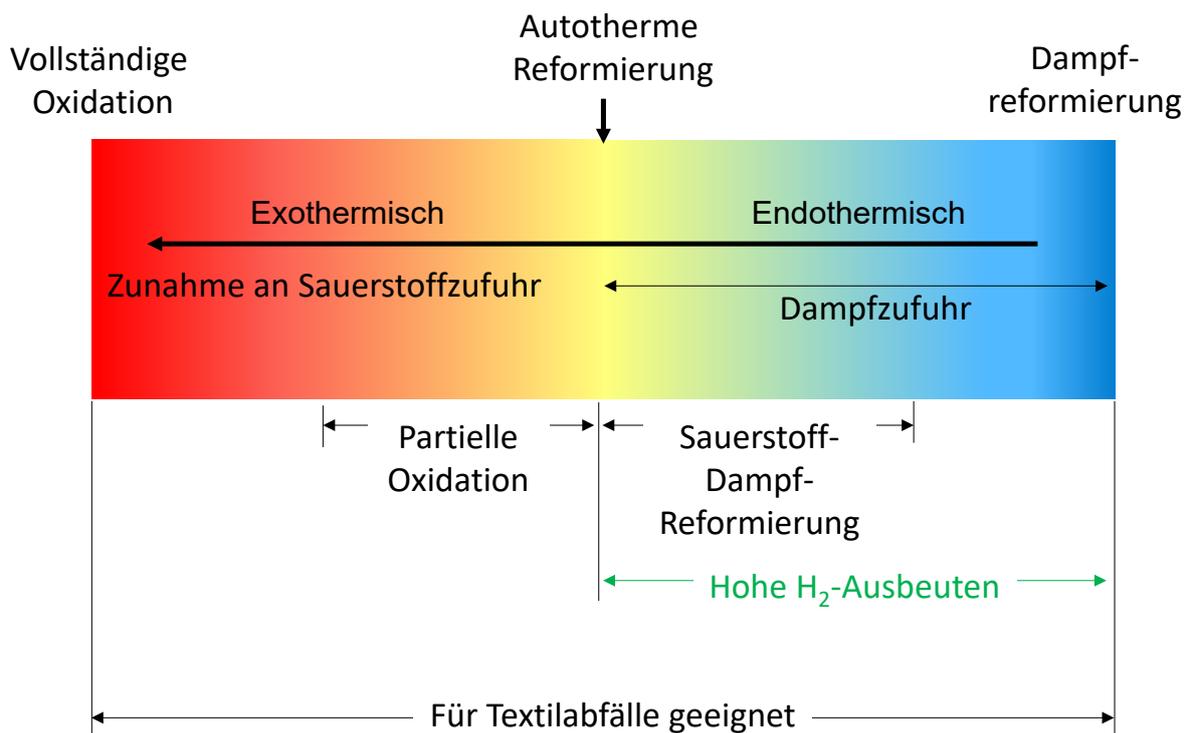


Abbildung 8-4: Vereinfachte Darstellung der thermochemischen Umsetzung mit Eingliederung der partiellen Oxidation, autothermen Reformierung und Dampfreformierung [eigene Darstellung angelehnt an Mosinska 2020]

### 8.3 Vergasungsarten für Textilabfälle

Prinzipiell kommen alle Arten der Vergasung für die Umsetzung der Textilabfälle in Betracht. Die höchste Wasserstoffausbeute erzielt die Dampfreformierung. Jedoch muss diesem Prozess Wärme zugeführt werden. Je mehr Sauerstoff zugeführt wird, umso mehr wird aus dem Ausgangsmaterial Energie gewonnen, jedoch zugleich Wasserstoff zu Wasser oxidiert. Optimal für die Herstellung von Wasserstoff aus Textilabfällen ist damit entweder eine autotherme Vergasung mit Sauerstoff und Wasserdampf oder eine allotherme Vergasung mit Wasserdampf.

## 8.4 Vergasung von Synthefasern

Zur Vergasung von Textilfasern aus Kunststoff liegen wenige Untersuchungen vor. Hauptkunststoff in Alttextilien ist Polyester. Untersuchungen zur Vergasung von Polyester beziehen sich meist auf Polyethylenterephthalat (PET) aus Verpackungen. Andere Vergasungsstudien fokussieren auf PE, PP und PS, welche in der Bekleidung eher eine untergeordnete Rolle einnehmen.

Kunststoffe unterscheiden sich von anderen Einsatzstoffen der Vergasung wie z. B. Biomasse und Kohle in der Regel durch einen geringeren Feuchtegehalt. Darüber hinaus ist die Feuchte oberflächlich und trocknet schnell, da es keine Diffusionsrestriktionen gibt. Der Trocknungsschritt spielt damit eine untergeordnete Rolle. Der endotherme Pyrolyseschritt enthält eine Vielzahl von komplexen chemischen Reaktionen, bei denen flüchtige Verbindungen (Gase und Teere) und ein fester Rückstand (Kohle) entstehen. Kunststoffe haben eine schlechte Wärmeleitfähigkeit und Kunststoffpartikel verkleben bei Überschreitung der Schmelztemperatur zu größeren Agglomeraten, wodurch die thermische Zersetzung behindert werden kann. Um diese Probleme zu verringern, sollte der Vergaser über eine hohe Wärmeübertragungsrate verfügen. Dadurch kann das Agglomerieren der Kunststoffteile verringert werden. Kunststoffe besitzen auch einen deutlich geringeren Ascheanteil als andere Einsatzstoffe. Der heterogene Vergasungsschritt, d. h. der Reaktionsschritt zwischen Gas und Feststoff spielt daher bei der Kunststoffvergasung eine geringere Rolle.

Der hohe Anteil an flüchtigen Bestandteilen in Kunststoffen sorgt für eine höhere Teerbildung im Vergleich zu Einsatzstoffen wie Biomasse und Kohle. Allerdings ist zu beachten, dass die Menge an Teer von den Verfahrensparametern, dem Reaktordesign und dem Einsatzstoff abhängt. Die Teerbildung bei Biomasse (und ähnlich für Kohle) erfolgt durch die direkte Freisetzung von aromatischen Verbindungen bei der Ligninzersetzung und einem Mechanismus einer Wasserstoffabspaltung und Acetylenanbau. [Lopez, 2018]

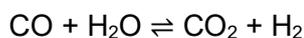
Für Kunststoffe wurde in letzter Zeit vermehrt die Pyrolyse mit nachgeschalteter Dampfreformierung untersucht. Das Verfahren zeigt nach Barbarias (2018) vielversprechende Ergebnisse, ist aktuell aber nur im Labormaßstab erprobt. Aktuell ist eine großtechnische Umsetzung noch nicht möglich. Viele der Untersuchungen wurden nur im Batchbetrieb durchgeführt und müssen sich erst noch in einem kontinuierlichen Betrieb beweisen. Das Scale-Up von Festbettverfahren stellt sich zudem meist als schwierig dar. Studien an Festbettreaktoren verzeichneten darüber hinaus eine starke Verkohlung, die den Katalysator belegte und den Gasstrom durch den Reaktor behinderte. Wirbelschichtreaktoren bieten ein einfacheres Scale-Up und haben geringere Verkohlungsprobleme. Allerdings wurde im Labor schon nach zwei Stunden eine deutliche Abnahme der Katalysatoraktivität festgestellt. [Barbarias, 2018]

## 8.5 Wasserstoffausbeute

Die Wasserstoffausbeute des Vergasungsprozesses ist durch das chemische Gleichgewicht der Reaktionen limitiert. Für eine hohe Ausbeute ist Wasserdampf als Vergasungsmittel am besten geeignet. Wird ausschließlich Wasserdampf als Vergasungsmittel eingesetzt, ist der Prozess allotherm, benötigt also eine externe Wärmequelle. Meist wird zusätzlich zum Wasserdampf Sauerstoff oder Luft in den Vergaser eingebracht. Zur Bereitstellung des Sauerstoffs ist in der Regel eine Luftzerlegungseinheit notwendig.

Die Wasserstoffausbeute sinkt mit steigender Menge an zugeführtem Sauerstoff, da Wasserstoff mit dem Sauerstoff zu Wasser reagiert. Die optimale Sauerstoffmenge muss daher so hoch sein, dass genügend Energie für den Prozess bereitgestellt wird, aber so niedrig, dass die Wasserstoffausbeute nicht signifikant sinkt. Luft ohne den Einsatz von zusätzlichem Wasserdampf ist zwar das günstigste Vergasungsmittel, eignet sich aufgrund des hohen Stickstoffgehalts jedoch nicht oder nur begrenzt zur Wasserstofferzeugung. Der in der Luft enthaltene Stickstoff verschlechtert zum einen die Energiebilanz, da er mit aufgeheizt werden muss und um anderen wird die anschließende Gasaufbereitung aufwendiger.

Das chemische Gleichgewicht der Wassergas-Shift-Reaktion verschiebt sich mit steigenden Temperaturen von den Reaktionsprodukten zu den Reaktionsedukten [Mahishi 2007]:



Mit steigenden Temperaturen nimmt in der Regel der Wasserstoffgehalt im Produktgas zu und der Gehalt an Kohlenmonoxid und leichten Kohlenwasserstoffen ab. Optimale Temperaturen für die Wasserstoffausbeute liegen bei 800 bis 850°C. Bei Temperaturen darüber kommt es wieder zu einer leichten Abnahme des Wasserstoffgehalts im Produktgas. Temperaturen über 2.000°C erlauben in der Regel ein breiteres Brennstoffspektrum.

Für die Wasserstoffausbeute ist die Vergasung bei Atmosphärendruck optimal; bei höheren Drücken sinkt sie. Niedrigere Drücke hingegen erhöhen die Ausbeute nur gering, so dass der technische Aufwand einer Vergasung bei Unterdruck nicht gerechtfertigt ist [Mahishi 2007].

Auch das Verhältnis von Wasserdampf zu Einsatzstoff hat einen Einfluss auf die Wasserstoffausbeute: Je höher das Verhältnis, desto höher ist die Ausbeute. Ab einem Verhältnis von 1,5 (bei 1.273°C, 1 bar) erhöht sie sich nur noch geringfügig. Durch den hohen Energiebedarf für die Erzeugung des Wasserdampfs wird daher ein molares Verhältnis von Wasserdampf zu Einsatzstoff von < 3 vorgeschlagen. [Mahishi 2007]

Mit Hilfe der Sorption Enhanced Gasification (SEG) kann die Ausbeute weiter erhöht werden. Dabei wird Kohlendioxid in situ im Vergasungsreaktor durch ein Adsorptionsmittel gebunden.

Dadurch verschiebt sich das Reaktionsgleichgewicht weiter in Richtung Wasserstoff. Als Adsorptionsmittel sind günstige natürliche Materialien wie Kalkstein geeignet. Es muss anschließend regeneriert werden [Parvez 2021]. Dafür eignen sich vor allem allotherme Vergaser mit einer Brennkammer, wie etwa der DFB-Vergaser (Abschnitt 8.8.5).

## 8.6 Produkte der Vergasung

Neben der Produktion von Wasserstoff ist auch die Produktion eines Synthesegases aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff möglich. Nach einer Reinigung und Aufwertung des Gases kann das Synthesegas als Rohstoff für die chemische Industrie verwendet werden. Je nach Verarbeitungsweg kann dabei auch der Kohlenstoff wiederverwendet werden. Methanol ist eines der Hauptprodukte, das aus Synthesegas gewonnen werden. Methanol wiederum kann zu einer Vielzahl weiterer Chemikalien wie z. B. Olefine umgesetzt werden. Leichte Olefine (Ethylen und Propylen) können zur Herstellung von Polyethylen und Propylen dienen. Außerdem ist die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen aus Synthesegas möglich. Abbildung 8-5 zeigt Synthesegas-Verwertungswege zur Herstellung von chemischen Grundstoffen.

Im Rahmen dieser Studie wird die Erzeugung von Methanol und anderen chemischen Grundstoffen aus Textilabfällen nicht näher betrachtet.

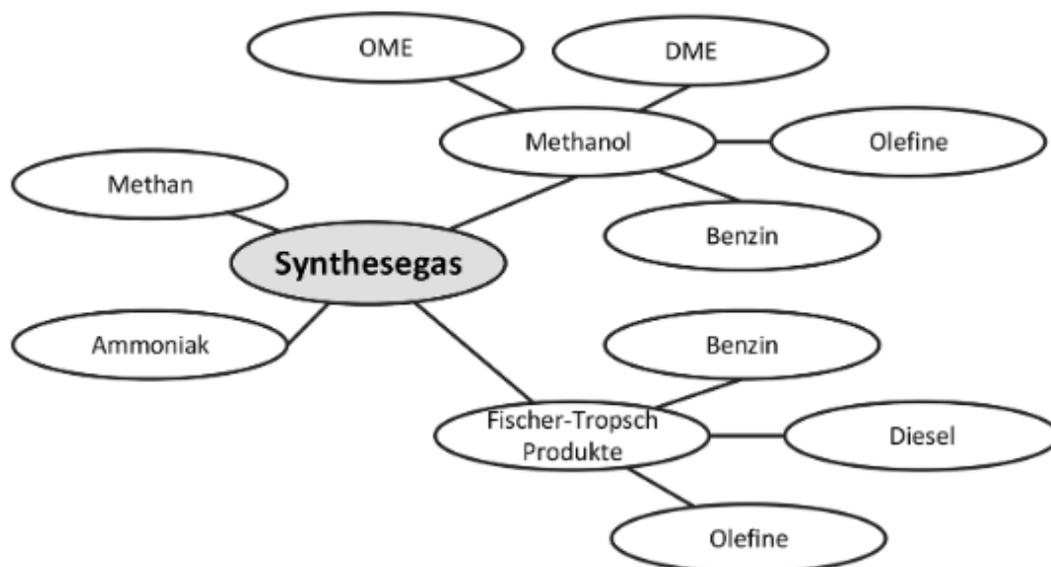


Abbildung 8-5: Synthesegas-Verwertungswege zur Herstellung von chemischen Grundstoffen [Lechleitner, 2019]

## 8.7 Literaturrecherche zu Vergasung von Textilabfällen

Die thermochemische Behandlung von Textilabfällen zur Gewinnung von Synthesegas oder Wasserstoff wurde bisher nicht realisiert und demnach bisher auch kaum untersucht. Folgend nicht berücksichtigt ist die thermochemische Behandlung von Textilien zum chemischen Recycling. Folgende Patentschriften und Publikationen wurden ermittelt.

### 8.7.1 Patent CN104479758A – Gasification method of waste textile fabrics

Das Patent beschreibt ein Vergasungsverfahren von Textilien mit  $\text{CO}_2$  als Vergasungsmittel. Eisencarbonat, Kalziumcarbonat, Natriumcarbonat oder einer Mischung davon werden als Katalysator eingesetzt. In einem ersten Pyrolyseschritt werden die Textilien bei 300 bis 400°C zu gasförmigen Kohlenwasserstoffverbindungen und  $\text{CO}_2$  zersetzt. Im zweiten Schritt werden die Kohlenwasserstoffverbindungen mit Kohlenstoffdioxid bei Temperaturen von 800 bis 1.000°C zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff vergast.

Das Patent unterscheidet sich von anderen Vergasungstechnologien durch den Fokus auf Textilabfälle und den Einsatz von  $\text{CO}_2$  als Vergasungsmittel.

Als mögliche Einsatzstoffe werden Baumwolle, Wolle, Seide, Flachs, Ramie, Maulbeerseide, Terylen, Polyamidfaser, Acrylfasern und Tencel genannt. Das Verfahren soll sowohl für Festbett- als auch Wirbelschichtvergaser geeignet sein. Das Patent wurde von der Nanjing University of Science and Technology in China eingereicht. [CN104479758A, 2014]

Das Verfahren eignet sich für die Herstellung von Synthesegas. Der Fokus auf die Wasserstoffproduktion erscheint durch den Einsatz von  $\text{CO}_2$  als Vergasungsmittel nicht sinnvoll. In diesem Fall ist es thermodynamisch und prozesstechnisch sinnvoller direkt das Pyrolysegas mit Wasserdampf zu vergasen.

### 8.7.2 Valorisation of textile waste via steam gasification in a fluidized bed reactor

An der Chalmers University of Technology wurde im Labormaßstab die Vergasung von Polyester, Baumwolle und einem Polyester/Baumwoll-Gemisch untersucht. Die Textilien wurden vor dem Versuch pelletiert. Der Versuch wurde in Anlehnung an das von der TU Wien entwickelte Dual Fluidized Bed Verfahren durchgeführt. Die Umsetzung war bei allen drei Einsatzstoffen gut. Reine Baumwolle erzeugte die höchste Ausbeute an Permanentgas von 0,8 bis 0,9  $\text{kg/kg}_{\text{daff}}$ . Polyester erzeugte mit 0,7 bis 0,8  $\text{kg/kg}_{\text{daff}}$  etwas weniger Permanentgas. Am geringsten war die Ausbeute mit 0,5 bis 0,7  $\text{kg/kg}_{\text{daff}}$  beim Textilgemisch. Bei der Vergasung des Polyesters und des Gemisches war der Teeranteil im Produktgas sehr hoch, so dass eine Teerkondensation in der Produktgasstrecke notwendig wäre. Es ist allerdings zu beachten,

dass das nur ein erster Tastversuch war und weitere Untersuchungen und Optimierungen notwendig und möglich sind. [Vela, 2019]

In Abbildung 8-1 zeigt die Ausbeute an CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> bei den unterschiedlichen Eingangsstoffen und bei unterschiedlichen Temperaturen. Der CO<sub>2</sub>-Anteil ist bei allen drei Einsatzstoffen sehr hoch. Der ebenfalls hohe CO-Anteil könnte anschließend über eine Wassergas-Shift-Reaktion zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt werden.

Tabelle 8-1: Ausbeute an CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> in Vol-% bei der Vergasung von Polyester und Baumwolle bei verschiedenen Temperaturen [Rittfors 2020]

Material	Temperatur	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>
		in Vol-%	in [Vol-%]	in [Vol-%]	in [Vol-%]
<b>Polyester</b>	650°C	59,7	31,5	2,2	6,5
<b>Polyester</b>	750°C	63,1	21,5	10,4	5,0
<b>Polyester</b>	850°C	50,9	21,6	20,5	7,0
<b>Baumwolle</b>	650°C	33,2	31,2	27,8	7,8
<b>Baumwolle</b>	750°C	34,9	31,6	23,9	9,7
<b>Baumwolle</b>	850°C	47,1	20,0	29,5	3,4
<b>Gemischt</b>	650°C	54,2	30,7	10,0	5,2
<b>Gemischt</b>	750°C	49,7	27,2	14,8	8,2
<b>Gemischt</b>	850°C	35,8	30,3	23,2	10,7

### 8.7.3 Oxygen Gasification of Municipal Solid Waste in a Fixed-Bed Gasifier

In dieser Studie von der Nanjing University of Science and Technology in China wurde unter anderem die Vergasung von Textilien mit Sauerstoff in einem Festbettvergaser untersucht. Dabei wurde der Einfluss der Temperatur, des Äquivalenzverhältnisses (Sauerstoff/Einsatzstoff-Verhältnis geteilt durch das Sauerstoff/Einsatzstoff-Verhältnis bei vollständiger Verbrennung) und die Entwicklung der Gasfreisetzung untersucht. Bei höheren Temperaturen stieg dabei die Ausbeute an Wasser und Kohlenmonoxid. Wenn das Äquivalenzverhältnis zunimmt, sinkt der Anteil an brennbaren Gasen im Produktgas und der CO<sub>2</sub>-Anteil steigt. Ein Äquivalenzverhältnis von 0,18 bis 0,23 wird als optimal für die Produktion eines Produktgases mit hohem unterem Heizwert angesehen. Höhere Temperaturen und Äquivalenzverhältnisse

wirken sich positiv auf die Gasausbeute aus und reduzieren den Anteil an Kohle und Teer. [Niu, 2014]

## 8.8 Vergasungsverfahren für Abfälle

### 8.8.1 Ebara Ube Process

Ebara ist eine japanische Firma, die Wirbelschichtvergasungsanlagen anbietet. Das Verfahren wurde Pressurized twin internally circulating fluidized-bed gasification system (Twin Rec) genannt [Ciuta 2018] und wird in Kooperation mit UBE Industries Ltd. als Ebara Ube Process weiterentwickelt [Ebara 2020]. Dabei wird erst in einem Wirbelschichtvergaser bei ca. 600°C ein Synthesegas erzeugt, das anschließend in einer Brennkammer bei ca. 1.400°C teiloxydiert wird. Es gibt derzeit 12 Anlagen, in denen Siedlungsabfälle und industrielle Abfälle umgesetzt werden. Die jährliche Kapazität liegt zwischen 14.400 und 126.000 t. Drei Anlagen stehen in Korea, der Rest in Japan [Ciuta 2018]. Der Chemikalienhersteller Showa Denko nahm 2003 eine großtechnische Ebara-Anlage zur Produktion von Wasserstoff aus Kunststoffabfällen in Betrieb. Die Kunststoffabfälle erfordern dabei eine aufwändige Aufbereitung zu Briketts. Dabei werden die angelieferten Kunststoffballen zunächst geöffnet. Anschließend erfolgt eine Zerkleinerung und Abtrennung von Metallpartikeln (ca. 1-2% des Inputs). Über 2 Parallele Extruder findet anschließend die Brikettierung statt. Dabei wird auch der Feuchtigkeitsgehalt reduziert. Die fertigen Briketts haben eine Länge von ca. 15 cm. Die Briketts werden anschließend gesiebt, um feiner Partikel und fehlerhafte Briketts auszusortieren. Der Aufbereitungsweg vom Plastikballen zum kompakteren Einsatzmaterial ist in Abbildung 8-6 dargestellt. [Quicker, 2019]



Abbildung 8-6: Einsatzmaterial Ebara Ube Anlage; links: Plastikballen bei Anlieferung, mitte: Extruder, rechts: Plastikbriketts [Quicker, 2019]

Die Vergasung läuft in zwei Schritten ab. Im ersten Schritt werden die Briketts konstant von oben der Wirbelschicht zugeführt und bei einer Temperatur zwischen 600°C und 800°C vergast. Als Vergasungsmittel wird eine Mischung aus Sauerstoff und Wasserdampf verwendet. Es entsteht ein Gemisch aus Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Kohle und Partikel. Das Produktgas wird dem zweiten Vergaser zugeführt. Asche, Metalle und andere anorganische Stoffe werden ausgetragen. Vorgeheizter Sauerstoff und Wasserdampf werden von oben und der Seite zugeführt. Durch die Teiloxidation des Gases werden Temperaturen von 1.300 bis 1.500°C erreicht. Dadurch wird die Asche geschmolzen und die entstehende Schlacke nach unten geführt. Am Boden des Reaktors werden das Gas und die Schlacke mit zuge düstem Wasser abgekühlt, bevor sie in ein Wasserbad geführt werden. Die Schlacke sammelt sich am Boden des Wasserbads und kann dort abgeführt werden.

Das Synthesegas wird anschließend einem alkalischen Wäscher zugeführt. Dabei werden Salzsäure und andere Halogenverbindungen entfernt. Durch eine Wassergas-Shift-Reaktion wird die Wasserstoffausbeute erhöht. Anschließend werden Schwefelverbindungen abgetrennt. Das Gas wird gekühlt und verdichtet, um das CO<sub>2</sub> zu verflüssigen und abzutrennen. Das CO<sub>2</sub> wird als Trockeneis vermarktet. Der Wasserstoff wird zusammen mit fossilem Wasserstoff (ca. 33%) zur Produktion von Ammoniak eingesetzt. [Quicker 2019, Ebara 2021]

Eignung für Textilabfälle: Aktuell wird das Verfahren für Kunststoffabfälle, Schredder-Rückstände, Ersatzbrennstoffe, Altreifen, und ähnlichem eingesetzt. Der Einsatz von Textilien ist prinzipiell damit nach entsprechender Aufbereitung zumindest in Form einer Co-Vergasung auch denkbar. Das Verfahren ist in Abb.8-7 dargestellt.

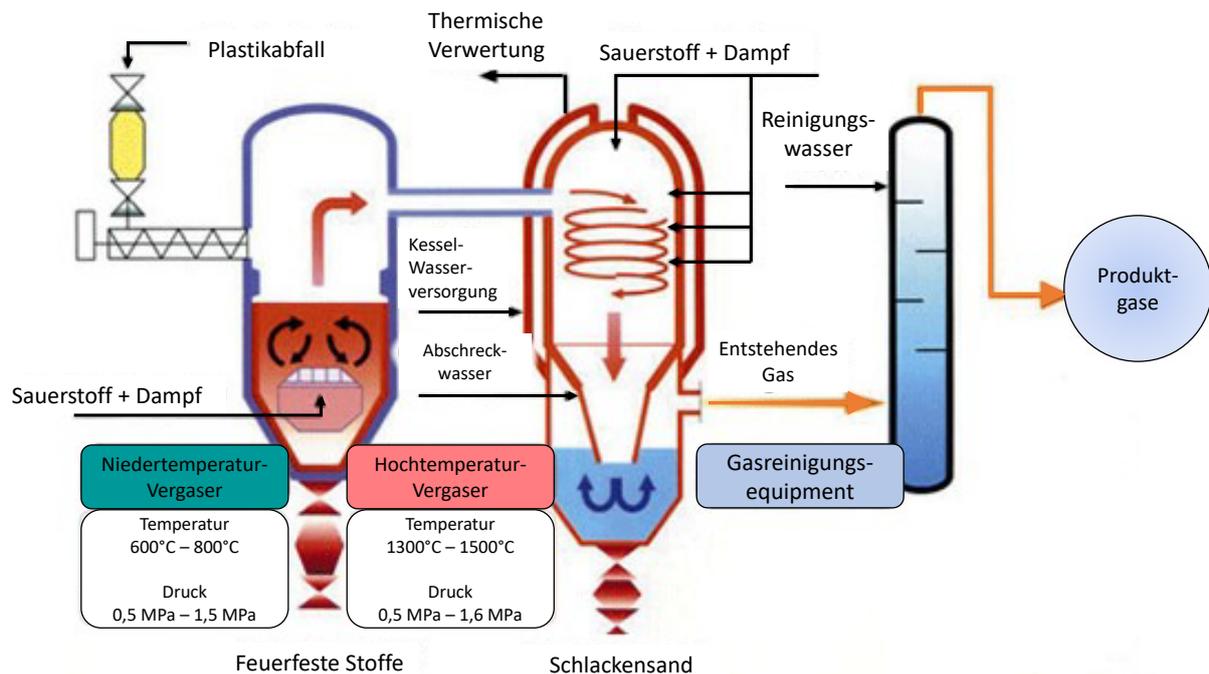


Abbildung 8-7: Ebara Ube Process Pressurized twin internally circulating fluidized-bed gasification system [Ebara, 2022]

### 8.8.2 InEnTec / Plagazi

Die amerikanische Firma InEnTec bietet ein Plasmavergasungsverfahren für Abfälle an. In einem Gleichstromfestbettvergaser wird mit Sauerstoff und Wasserdampf bei 800 bis 1.200°C ein wasserstoffreiches Synthesegas produziert. Die festen Rückstände Kohle und Asche werden anschließend in einem plasmagestützten Schmelzprozess bei ca. 1.400°C weiter umgesetzt. Das in den beiden Prozessen erzeugte Synthesegas kann bei 1.400°C weiterreagieren. Teere werden hierbei zerstört. Als feste Rückstände entstehen Metalle und verglaste Schlacke. InEnTec hat nach eigenen Angaben zwei Anlagen in den USA, zwei in Japan und je eine in Taiwan und in Malaysia in Betrieb. Außerdem entwickelt InEnTec in einem aktuellen Horizon-2020-Projekt an einer Anlage zur Produktion von 30.000 t/a Flugzeugtreibstoff mit. Dafür wird das im Vergaser gebildete Synthesegas in einem bakteriellen Fermenter in Ethanol umgewandelt [Lanzatech 2021]. InEnTec hat mit Plagazi ein Kooperationsabkommen für Europa unterzeichnet. Plagazi plant derzeit in Premnitz eine Anlage zur Produktion von Wasserstoff aus Abfällen [Plagazi 2021]. Das Verfahren ist in Abbildung 8-8 dargestellt.

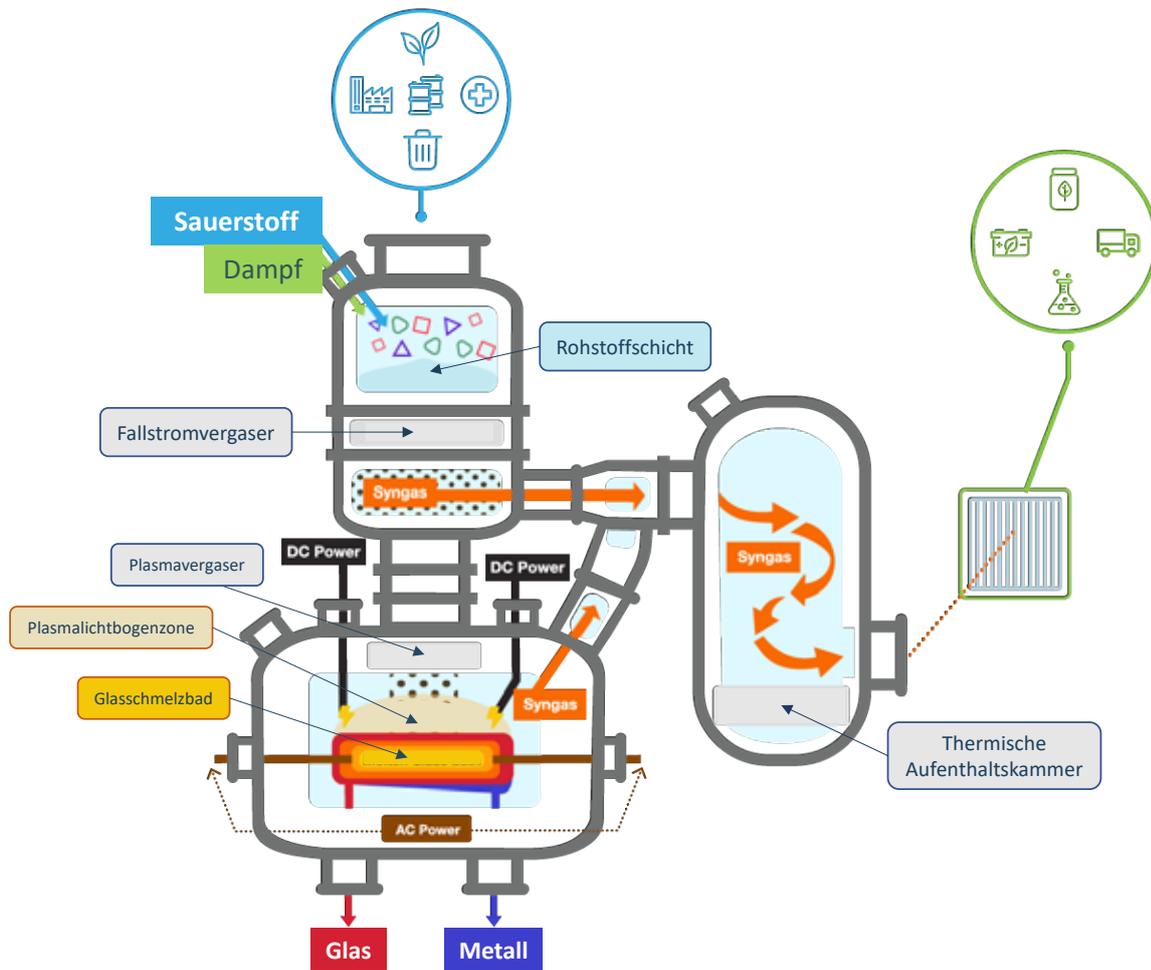


Abbildung 8-8: InEntec Vergasungstechnologie [InEntec, 2022]

### 8.8.3 Enerkem

Enerkem ist eine kanadische Firma, die Wirbelschichtvergasungsanlagen für die Vergasung von Siedlungsabfällen zur Produktion von Methanol und Ethanol anbietet. Eine kommerzielle Anlage für Ersatzbrennstoffe wurde 2016 in Edmonton in Betrieb genommen und hat eine Kapazität von 100.000 t/a. Als Vergasungsmittel werden Wasserdampf und Sauerstoff eingesetzt. Die Vergasung findet bei einem Druck zwischen 1 und 5 bar und einer Temperatur von ca. 750°C statt. Aufgrund der geringen Vergasungstemperatur enthält das Produktgas relevante Mengen an Teer, das in einem weiteren Prozessschritt mittels Wasserdampfpreformierung umgesetzt werden kann. Nach einer Wärmerückgewinnung wird das Produktgas gequench, und Schwefelwasserstoff, Schwermetalle und CO<sub>2</sub> werden entfernt [Perkins 2020]. Das entstandene Methan reagiert in Anwesenheit eines Katalysators mit dem Kohlenstoffmonoxid zu Methanol oder Ethanol [Patent US8080693B2].

Gemeinsam mit Shell plant Enerkem derzeit eine Abfallverwertungsanlage, um aus geringwertigen gemischten Rückständen aus dem Recyclingflugbenzin und sonstige Kraftstoffe und Rohstoffe für die Chemikalienproduktion herzustellen. Die Anlage soll bis zu 360.000 t/a verarbeiten und ca. 80.000 t/a Output produzieren. Eine finale Investitionsentscheidung soll Ende 2022 fallen. [EUWID 2021] Das Verfahren ist in Abbildung 8-9 dargestellt.

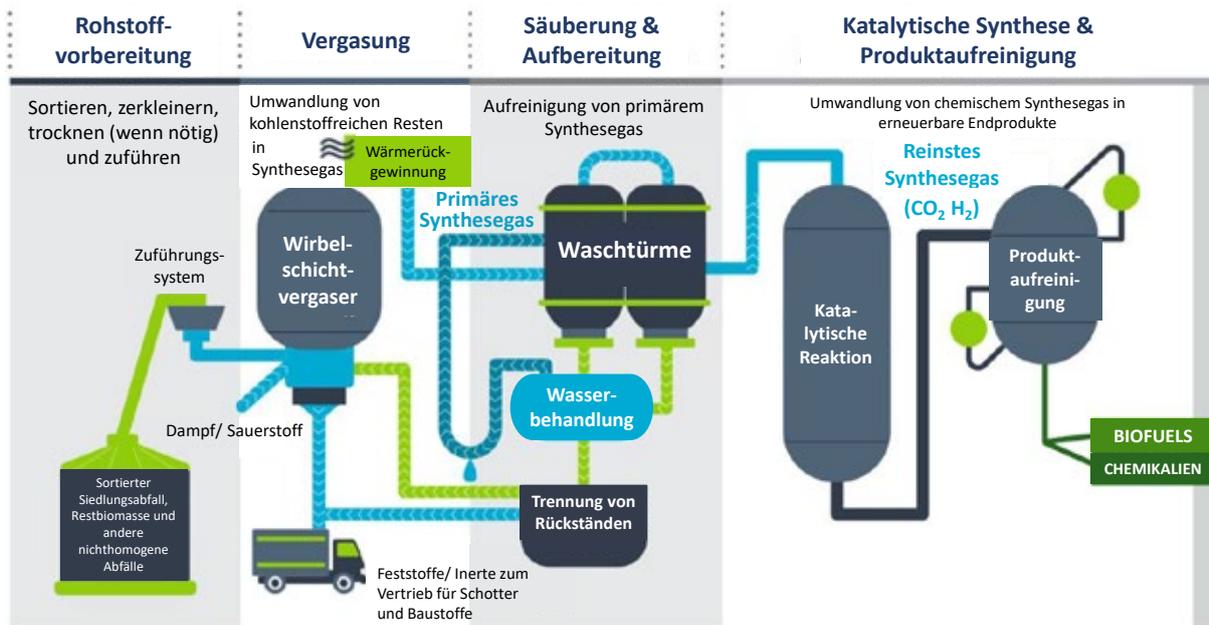


Abbildung 8-9: Enerkem Vergasungstechnologie [Enerkem, 2022]

### 8.8.4 Sierra Energy

Die amerikanische Firma Sierra Energy bietet das Fast-Ox-Vergasungsverfahren für nichtrecycelbare Abfälle an, einschließlich Siedlungsabfälle, Biomasse, Schredderleichtfraktion, Altreifen, medizinische Abfälle, gefährliche Abfälle und Gewerbeabfälle. Der wichtigste Parameter ist der Kohlenstoffgehalt, da durch ihn die notwendige Menge Vergasungsmittel (Sauerstoff und Wasserdampf) bestimmt wird. Andere Parameter wie Wassergehalt und Partikelgröße beeinflussen die Effizienz des Verfahrens, werden aber über die Vorbehandlung kontrolliert. Je nach Anlagengröße wird der Einsatzstoff vorher auf eine Korngröße von 2,5-7,5 cm bei einer Anlagenkapazität 10-25 t/d und kleiner 15 cm bei größeren Anlagen geschreddert. Um eine hohe Effizienz zu gewährleisten, sollte der Wassergehalt kleiner 20% sein [Sierra Energy 2021a]. Es gibt eine kommerzielle Anlage in Fort Hunter Liggett, die 2018 in Betrieb genommen wurde und im Februar 2019 die Demonstrationsphase abschloss. Die Anlage produziert Synthesegas aus Holzabfällen und soll zukünftig Elektrizität und flüssige Treibstoffe

produzieren [SERDP 2021]. Zwei Anlage mit einem Durchsatz von 100 t/d zur Herstellung von Wasserstoff sind derzeit in Planung. [Sierra Energy 2021b] Der Einsatz von Textilabfällen in der Anlage ist nach vorhergehender Zerkleinerung unproblematisch.

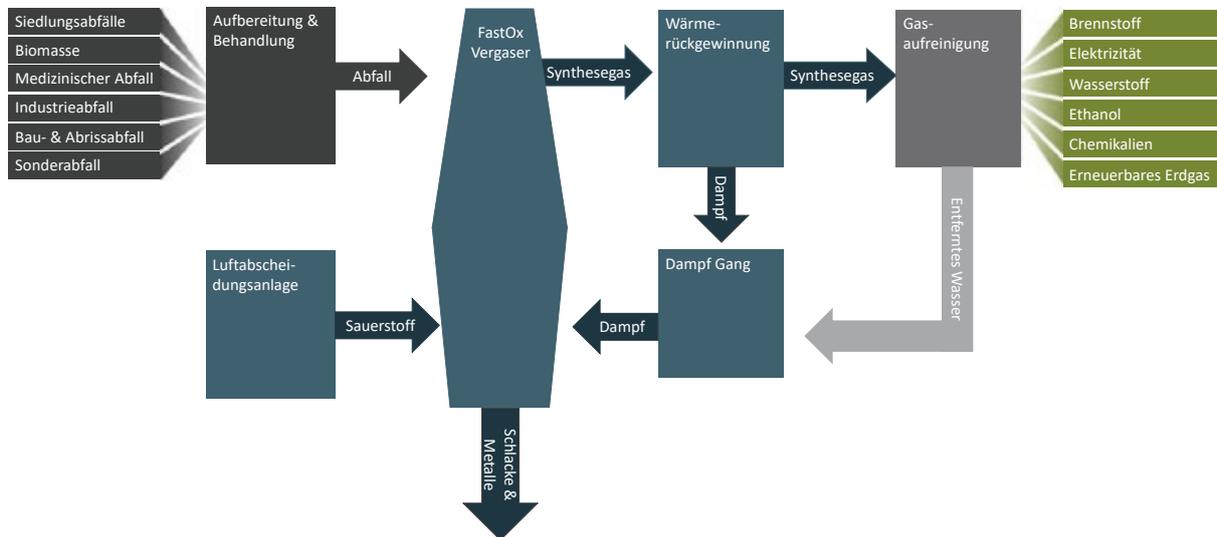


Abbildung 8-10: FastOx-Vergasungstechnologie von Sierra Energy [Sierra Energy, 2022]

### 8.8.5 Dual Fluidized Bed (DFB)

Das DFB-Verfahren wurde erstmals in einer 100 kWth Pilotanlage an der TU Wien umgesetzt. Der Prozess besteht aus zwei Reaktoren. In einem findet die allotherme Vergasung mit Wasserdampf statt im anderen wird über einen Verbrennungsprozess die Wärme erzeugt. Die Wärmeübertragung zwischen den beiden Reaktoren erfolgt dabei über das Bettmaterial. Die Vergasungstemperatur beträgt zwischen 750 und 850°C. Im weiterentwickelten Verfahren ist die Vergasung in zwei Teile geteilt. Dabei folgt auf den ersten Vergasungsschritt, ein zweiter Schritt bei dem bei Temperaturen zwischen 900 und 970°C eine Reformierung und ein Cracking von Teer stattfinden [Mauerhofer 2019].



Das GoBiGas-Projekt (Gothenburg Biomass Gasification Projekt) lief von 2005 bis 2018 und war ein Projekt der Göteborg Energi AB. 2014 ging die Demonstrationsanlage in Betrieb. Der Prozess der Anlage bestand aus zwei Schritten. Als erster Schritt wurde Biomasse in ein einem DFB (dual fluidized bed) Vergasungsschritt in ein Produktgas umgesetzt. Im zweiten Schritt erfolgte die Umsetzung zu Methan. Die Vergasungsanlage wurde von Valmet errichtet. Die Anlage konnte mit Holzpellets oder getrockneten Hackschnitzeln betrieben werden, wobei sie hauptsächlich mit Pellets betrieben wurde. Im Februar 2018 erreichte die Anlage 1800 h kontinuierlichen Betrieb und 100% der geplanten Kapazität. Nachdem die Ziele erreicht waren, entschied Göteborg Energi, dass der weitere Betrieb der Anlage nur gerechtfertigt wäre, wenn die Anlage kommerziell betrieben werden kann, die Anlage also von einer Demonstrationsanlage in eine kommerzielle Anlage weiterentwickelt werden könnte. Unter den 2018 gegebenen Bedingungen war dies jedoch nicht möglich. Die Anlage wurde stillgelegt – mit der Option einer Wiederinbetriebnahme, sollten sich die Marktbedingungen ändern.

Repotec ist darüber hinaus am französischen Gaya-Projekt beteiligt. Das Projekt hat das Ziel, die Machbarkeit der Herstellung von Biomethan durch Biomassevergasung zu demonstrieren. [Gaya, 2014]

Tabelle 8-2: DFB-Vergaser [IEA Bioenergy 2019]

Ort	Verwendung	Inbetriebnahme	Lieferant	Status
Güssing (AT)	Gasmotor	2002	AE&E, Repotec	stillgelegt
Oberwart (AT)	Gasmotor, H <sub>2</sub>	2008	Ortner Anlagenbau	stillgelegt
Senden (DE)	Gasmotor	2011	Repotec	stillgelegt*
Burgeis (IT)	Gasmotor	2012	Repotec/RevoGas	in Betrieb
Göteborg (S)	Biogas	2013	Repotec/Valmet	stillgelegt
Californien (USA)	F&E	2013	GREG	in Betrieb
Gaya (FR)	Biogas, F&E	2016	Repotec	im Bau
Nonbua (THA)	Gasmotor	2018	GRETHA	in Betrieb

\* Wird mit neuer Vergasungstechnologie fortgeführt

## 8.9 Investitions- und Betriebskosten

Die Erzeugung von Wasserstoff aus Abfällen und im speziellen Textilabfällen wurde in Europa bisher nicht großtechnisch realisiert.

Die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage ist schwer bestimmbar, zumal eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien und Verfahrensdetails sowie unterschiedliche Einsatzstoffe existieren. Angaben reichen von spezifischen Kostenangaben pro kg Wasserstoff bis hin zu detaillierten Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Am Beispiel von Kraussler (2018) kann für die ökonomische Betrachtung ein erster, nachvollziehbarer Einblick gewonnen werden.

Für eine 100-MW-Ausführung des DFB-Vergasers berechnete Kraussler (2018) mit Bezugsjahr 2017 Investitionskosten von 77 Mio. €. Die jährlichen Kosten in Abbildung 8-13 ergeben sich aus der Bepreisung der in der Massenbilanz genannten Stoff- und Energieströme sowie aus nachvollziehbaren Aufschlägen für Personal, Instandhaltung, Versicherung und Steuern und Produktionsgemeinkosten. Die Anlage wird auf 20 Jahre abgeschrieben, die Diskontrate beziehungsweise der Return on Invest mit 10% angesetzt. Mittels Kapitalwertmethode ermittelte Kraussler (2018) für das DFB-Verfahren einer 100-MW-Anlage einen Wasserstoffpreis von 4,20 €/kg.

Der berechnete Wasserstoffpreis erscheint damit aktuell (2022) nicht konkurrenzfähig gegenüber konventionellen Verfahren zur Wasserstofferzeugung aus fossilen Energieträgern mit 1,5 bis 5 €/kg Wasserstoff [ASUE 2021]. Die Produktionskosten von grünem Wasserstoff aus Elektrolyse liegen heute zumeist bei 5 bis 8 €/kg, mit denen der hier ermittelte Wert für die Vergasung konkurrenzfähig wäre.

Abbildung 8-12 zeigt den hohen Anteil und damit Einfluss der Rohstoffkosten für das beschriebene Verfahren auf: Der Bezug von Hackschnitzeln stellt über 40% der operativen Gesamtkosten. Ließe sich das Verfahren für die Verwertung von Textilabfallstoffen adaptieren, ist dagegen mit niedrigeren Zukaufspreisen bis hin zu Zuzahlungen für die Annahme zu rechnen. Nunes et. al [Nunes, 2017] gingen für das Jahr 2015 von einem Preis von 25 €/t für Textilbriketts und 53 €/t für Hackschnitzel. Damit liegen die Kosten pro Tonne für die Textilabfälle bei ca. 50% der Kosten für Hackschnitzel. Nach Anpassungen bezüglich des Heizwerts und einer Reduzierung des Rohstoffpreises um 50% auf 44 €/t ergibt sich ein Betriebsergebnis von 13,4 statt 6,2 Mio €/a. Bei den in Nunes genannten Preis von 25 €/t läge das Betriebsergebnis bei 16,5 Mio €/a. Das Betriebsergebnis in Abhängigkeit vom Rohstoffpreis ist in Abbildung 8-13 dargestellt. Bei einem Wasserstoffpreis von 3 €/kg und einem Rohstoffpreis von 25 €/t könnte ein Betriebsergebnis von 5,7 Mio. €/a erzielt werden.

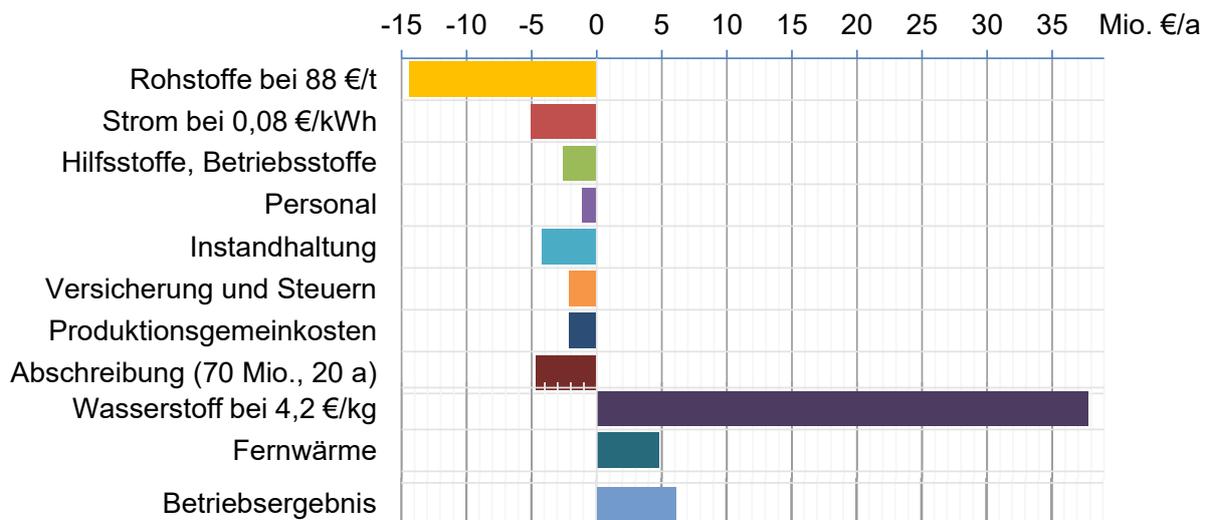


Abbildung 8-12: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines DFB-Vergasers mit 100 MW Leistung [nach Kraussler 2018]. Input 164.000 t Hackschnitzel pro Jahr.

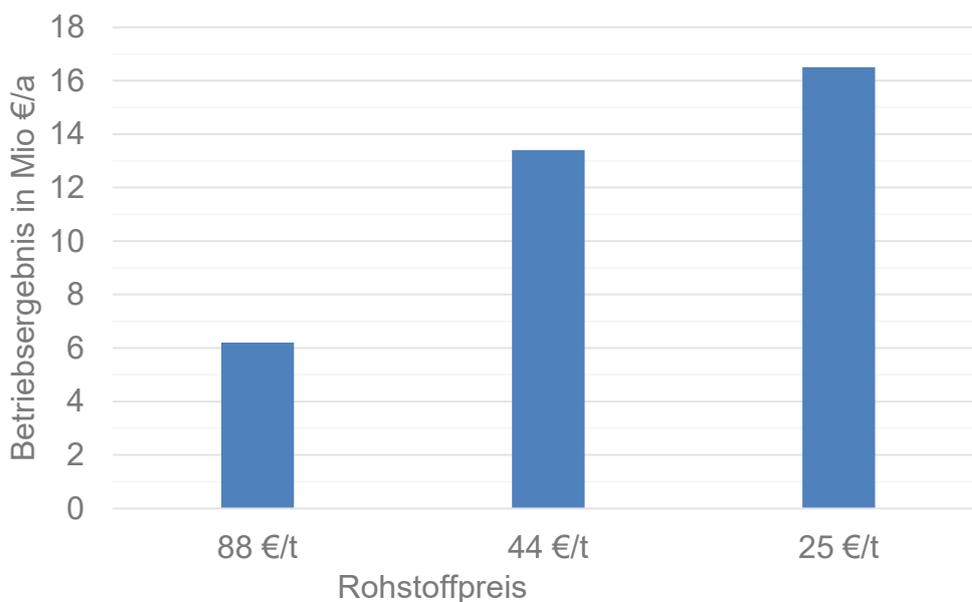


Abbildung 8-13: Betriebsergebnis in Abhängigkeit vom Rohstoffpreis bei einem 100 MW DFB Vergaser (eigene Berechnung mit Daten aus Kraussler, 2018)

Weitere Publikationen mit ökonomischen Daten Angaben sind älter oder nicht ausreichend nachvollziehbar [DBFZ 2013, Ducharme 2010, Herstellerangaben].

Seitens der Anlagenanbieter liegen zwar Aussagen für einen wirtschaftlichen Betrieb der Vergasungsanlagen mit einem konkurrenzfähigen Wasserstoffpreis vor. Die meisten Konzepte müssen sich jedoch in der Praxis noch unter realen Rahmenbedingungen unter Beweis stellen. Zu berücksichtigen ist, dass es langjährige Realisierungen in anderen Ländern gibt, und dass die Rahmenbedingungen und Marktpreise in der Energiewirtschaft einem ständigen Wandel

unterliegen. So ist der Preis von fossil hergestelltem Wasserstoff im Laufe des Jahres 2022 parallel zu den Energiepreisen und den Preisen für Emissionszertifikate stark gestiegen. [Chemietechnik, 2022]

Eine zukünftige kommerzielle Tragfähigkeit der Vergasung von Textilabfällen zu Wasserstoff ist als realistisch zu bewerten; sie ist jedoch von den Rahmenbedingungen abhängig. Starken Einfluss nehmen dabei der Abfall-Annahmeerlös und der Wasserstofflös, aber auch Investitionskosten und die Anlagenverfügbarkeit im Dauerbetrieb.

Der Heizwert für die Textilbriketts wird mit 16,8 MJ/kg angegeben. Mit einer Anlagenverfügbarkeit von 8.000 h/a ergibt sich eine Verwertbarkeit von 171.500 t/a Textilabfälle in der 100 MW Anlage. Dies entspricht dem 2,5-fachen der in Bayern verfügbaren zur thermochemischen Verwertung geeigneten Textilabfällen (70.000 t/a) und ca. 14.000 t/a Wasserstoff. Bei einem Wasserstoffpreis von 420 €/t ergibt sich damit ein Erlös von insgesamt 58,8 Mio. €/a.

Eine wirtschaftliche Bewertung des DFB-Vergasers für die Erzeugung von Biomethan zeigte deutlich, dass die Kosten pro produzierter MWh Biomethan mit der Anlagengröße sinkt (Tabelle 8-3). Die Ergebnisse sind auf die Produktion von Wasserstoff übertragbar. Eine Reduzierung der Anlagengröße von 100 auf 40 MW, um sie mit den in Bayern verfügbaren Textilabfälle auszulasten würde die Kosten für den produzierten Wasserstoff deutlich erhöhen. Aus Kostengründen erscheint es daher sinnvoller zusätzlich andere passenden Abfallströmen wie nicht recyclebaren Kunststoffabfällen, oder außerhalb von Bayern anfallende Textilabfälle in der Anlage einzusetzen.

*Tabelle 8-3: Geschätzte Produktionskosten für Biomethan bei der Nutzung von Abfällen aus der Fortwirtschaft [Thunmann, 2019]*

	<b>20 MW</b>	<b>100 MW</b>	<b>200 MW</b>
Investitionskosten - Abschreibung	430 SEK/MWh	199 SEK/MWh	145 SEK/MWh
Investitionskosten (Zinsen (5%))	258 SEK/MWh	120 SEK/MWh	87 SEK/MWh
Entwicklungskosten	43 SEK/MWh	20 SEK/MWh	15 SEK/MWh
Betriebskosten (ohne Brennstoff)	352 SEK/MWh	166 SEK/MWh	132 SEK/MWh
Brennstoffkosten	217 SEK/MWh	217 SEK/MWh	217 SEK/MWh
<b>Gesamtkosten</b>	<b>1300 SEK/MWh</b>	<b>722 SEK/MWh</b>	<b>596 SEK/MWh</b>

\* Bei 8.000 Volllaststunden pro Jahr, Abschreibung 20 a und 70% Anlageneffizienz für verschiedene Anlagengrößen

## 9 Konzept für die Wasserstofferzeugung aus Textilabfällen

### 9.1 Thermochemische Umsetzung

Prinzipiell sind alle Reaktortypen geeignet für die Umsetzung von Textilabfällen. Für die Produktion von Wasserstoff ist die Umsetzung mit Wasserdampf (allotherme Vergasung) oder einer Mischung aus Wasserdampf und Sauerstoff (autotherme Vergasung) sinnvoll. Wenn der Sauerstoff nicht von einer angrenzenden Gasaufbereitungsfirma zur Verfügung gestellt werden kann, ist eine Luftzerlegungseinheit notwendig. Dabei entsteht Stickstoff. Zusammen mit dem bei der Vergasung entstehenden Wasserstoff könnte der Stickstoff zur Ammoniaksynthese genutzt werden. Für die Wasserdampfbereitstellung kann Abwärme der Anlage genutzt werden.

Da Kunststoffe eine schlechte Wärmeleitfähigkeit haben können Kunststoffpartikel bei Erwärmung zu größeren Agglomeraten verkleben, wodurch die thermische Zersetzung behindert werden kann. Um diese Probleme zu verringern, sollte der Vergaser über eine hohe Wärmeübertragungsrate verfügen.

Für die Vergasung von Biomasse werden häufig Wirbelschichtreaktoren verwendet. Diese lassen sich weiter in zirkulierende Wirbelschichtreaktoren und stationäre Wirbelschichtreaktoren unterteilen. Obwohl zirkulierende Wirbelschichten hohe Umsetzungsraten und geringe Teergehalte ermöglichen, gibt es bisher keine Untersuchungen mit Textil- oder Kunststoffabfällen. Stationäre Wirbelschichten wurden bereits für die Umsetzung von Kunststoffen untersucht. Hauptvorteile sind [Lopez, 2017]:

- Hohe Wärme- und Massenübertragungsraten
- Hervorragender Feststoff- Gasphasen-kontakt
- Gute Temperaturkontrolle
- Gute Feststoffdurchmischungsrate
- Gute Flexibilität

Darüber hinaus ist der Maßstab und Entwicklungsgrad von Wirbelschichtreaktoren hoch. Beispiele für großtechnische Anlagen in denen bereits Kunststoffabfälle eingesetzt oder getestet wurden sind die Anlagen von Enerkem, Ebara UBE und der DFB-Vergaser.

Festbettvergaser haben den Vorteil, dass ihr Design und Betrieb einfach und die Investitionskosten verhältnismäßig gering sind. Hauptnachteile liegen in der schlechten Skalierbarkeit, dem schlechten Wärmetransfer und dem limitierten Feststoff-Gasphasen-Kontakt. Die Umsetzung von Textil- oder Kunststoffabfällen in Festbettreaktoren wurde bisher allerdings nur wenig

untersucht. [Lopez 2017] Eine der wenigen großtechnischen Festbettanlagen für (Kunststoff)Abfälle ist die Anlage von Sierra Energy.

Plasmareaktoren haben den Vorteil, dass sie hohe Temperaturen erreichen bei denen Teere fast vollständig zersetzt werden. Wie bei den Festbettreaktoren gibt es jedoch nur wenig Untersuchungen bezüglich Kunststoffabfällen. Eine großtechnische Anlage für den Einsatz von (Kunststoff-) Abfälle ist die Anlage von Inentec/Plagazi.

Flugstromvergaser erfordern einen hohen Aufbereitungsgrad des Einsatzstoffes. In der Regel wird dieser vorher pyrolysiert. Es gibt nur wenig Untersuchung bezüglich des Einsatzes von Kunststoffabfällen in der Flugstromvergasung. Der Einsatz von fein gemahlene Textilabfällen wäre im Prinzip machbar jedoch ist der Aufbereitungsaufwand und der Verschleiß des Zerkleinerungsgeräts aufgrund der im Textilabfall enthaltenen Metalle sehr hoch.

Bei der Umsetzung von Kunststoffen in Textilabfällen können Teere entstehen. Da diese in folgenden Anlagenteilen auskondensieren und dadurch Probleme verursachen können, gibt es verschiedene Lösungsansätze, um die Bildung von Teeren zu vermeiden oder diese anschließend aus dem Produktgas abzutrennen.

Teere bilden sich, da im Gegensatz zur Verbrennung das thermochemische Gleichgewicht nicht erreicht wird. Die Teerbildung kann damit durch die Vergasungsparameter (Temperatur und Verweilzeit) beeinflusst werden. Inentec/Plagazi nutzt zur Beseitigung von Teer im Produktgas einen angeschlossenen Reaktor (thermal residence chamber) in dem bei Temperaturen von 1.400°C das thermische Gleichgewicht erreicht wird. Der allotherme DFB-Vergaser nutzt einen Gaswäscher mit Rapsölmethylester, um Teere abzutrennen. Dabei entsteht ein Abfallprodukt, das anschließend in der Brennkammer zur Energieerzeugung verwendet werden kann. Die Ebara Ube Vergasung erfolgt 2-stufig. Die Teere, die in der ersten Stufe entstehen können in der zweiten Stufe umgesetzt werden. Stand der Technik zur Abtrennung von Teeren ist Gaswäsche und thermische Zersetzung.

Eine einstufige Umsetzung erscheint aufgrund der hohen Teerbildung bei der Vergasung von Polyester nur mit anschließender aufwendiger Teerabtrennung möglich.

Sollte eine stabile Betriebsführung aufgrund schwankender Materialzusammensetzung im Inputmaterial nicht möglich sein könnte über den zusätzlichen Eintrag von Material mit definierter Zusammensetzung ein stabiler Betrieb ermöglicht werden. Dies könnte z. B. in Form von Ersatzbrennstoffen mit spezifischer Qualität erfolgen. Bei Textilabfällen ist jedoch von einer relativ gleichbleibenden Zusammensetzung auszugehen.

## Anlagenkonzept

Für das weitere Anlagenkonzept wurde daher die Umsetzung in einer 2-stufigen stationären Wirbelschicht angenommen. Hauptgründe sind der hohe Entwicklungsgrad und die gute Wärmeübertragungsrate. Die Textilabfälle werden zunächst in einem Niedrigtemperaturvergaser bei Temperaturen zwischen 600 und 800°C mit Sauerstoff und Wasserdampf umgesetzt. Um die Wirbelschicht zu erzeugen, wird das Vergasungsmittel am Boden des Wirbelschichtvergasers über eine Dispersionsplatte eingebracht. Der Sauerstoff wird über eine Luftzerlegungseinheit in Form einer Druckwechseladsorption bereitgestellt. Nach der Umsetzung geht das erzeugte ungereinigte und mit Partikeln belastete Produktgas in eine Hochtemperaturvergasung. Diese findet ebenfalls mit Sauerstoff und Wasserdampf statt. Dabei wird in der ersten Stufe entstandener Koks und kondensierbare Kohlenwasserstoffe (Teer) sowie Dioxine und Biphenyle weitgehend umgesetzt. Das entstandene Produktgas muss anschließend abgekühlt und gereinigt werden.

Daraus folgt für die thermochemische Umsetzung in diesem Beispielkonzept:

- 2-stufige Wirbelschichtvergasung
  - 1-stufe Niedrigtemperatur: 600 bis 800°C mit Sauerstoff und Wasserdampf
  - 2-stufe Hochtemperatur: 1.300 bis 1.500°C mit Sauerstoff und Wasserdampf.
- Für die Sauerstoffbereitstellung wird eine Luftzerlegungseinheit (PSA) verwendet
- Für die Wasserdampfbereitstellung wird die Abwärme der Anlage genutzt
- Bei 8.000 Betriebsstunden im Jahr ergibt sich ein Textilabfallstrom von 8.750 kg/h
- Als Bettmaterial wird Sand verwendet.

### 9.1.1 Vorbehandlung

Prinzipiell eignen sich für die Vergasung alle kohlenstoffhaltigen Abfallstoffe. Dazu gehören Biomasse, Kunststoffe und Textilien. Je nach Verfahren können auch heterogene und verunreinigte Abfälle eingesetzt werden. Damit zeigt die Vergasung eine höhere Flexibilität gegenüber dem Einsatzstoffen als andere Recyclingverfahren für Textilien. Die Zusammensetzung der eingesetzten Stoffe beeinflusst jedoch die Zusammensetzung des Produktgases, so dass gewisse Stoffe nur im begrenzten Maße im Einsatzstoff enthalten sein sollen. Dazu gehören z. B. Polyamide aufgrund ihres Stickstoffgehalts. Hohe Halogengehalte (wie z. B. Chlor in PVC) können aufgrund der korrosiven Eigenschaften ebenfalls Probleme verursachen. Proteinbasierte Textilien (Wolle, Leder) enthalten Schwefelverbindungen. Um einen möglichst störungsfreien Prozess und eine hohe Ausbeute zu erreichen, müssen die Verfahrensparameter dem Einsatzstoff angepasst werden. Es kann wirtschaftlich sinnvoll sein gewisse

Qualitätsanforderungen an die Einsatzstoffe zu stellen, z. B., um weitere Gasreinigungsschritte zu vermeiden.

Die Textilabfälle müssen vor der thermochemischen Umsetzung zerkleinert werden. Die genaue angestrebte Korngröße hängt vom Aufgabe- und Fördersystem und von evtl. weiteren Aufbereitungsschritten ab. Typische Korngrößen liegen bei unter 15 cm. Anschließend sollten Metalle und andere Inertstoffe abgetrennt werden. Die Empfindlichkeit der Anlage auf Störstoffe hängt von der verwendeten Technik ab. Je nach Verfahren können Metalle im Prozess Probleme verursachen. Bei anderen Verfahren (z. B. Fast-Ox-Verfahren von Sierra Energy) wirken sich Metalle negativ auf den Wirkungsgrad aus.

Prinzipiell können dabei die gleichen Verfahren angewendet werden wie beim mechanischen Recycling von Textilabfällen. Nach dem Zerkleinern können magnetische Metallteile mittels Magnetes abgetrennt werden, während nicht magnetische nach dem Zerkleinern meist händisch aussortiert, werden müssen. Alternativ gibt es auch automatische System wie z. B. den Beater Cleaner von Margasa. Diese Maschine kann Fremdkörper mit unterschiedlicher Materialdichte mittels Zentrifugalkraft abtrennen. [Margasa, 2022]. Bei nassen Materialien kann eine Trocknung sinnvoll sein. Eine Reinigung bzw. Wäsche der Textilien ist nicht notwendig, da die meisten Verunreinigungen keine Probleme verursachen. Bei Flugstromverfahren werden die Einsatzstoffe in der Regel vorher pyrolysiert.

Für Wirbelschichtverfahren müssen die zerkleinerten Textilabfälle in der Regel anschließend brikettiert oder pelletiert werden. Für Festbett – und Plasmaverfahren ist dies nicht notwendig. Für Flugstromverfahren ist eine Pyrolyse des Einsatzstoffes notwendig. Eine Abtrennung der Metalle kann hier vor oder nach der Pyrolyse stattfinden.

Für den Einsatz in der in diesem Konzept vorgesehenen Wirbelschicht werden die Textilabfälle zunächst zerkleinert, Metalle werden magnetisch abgetrennt. Anschließend werden die Textilabfälle auf eine Größe von ca. 15 cm brikettiert. Produktgasaufbereitung

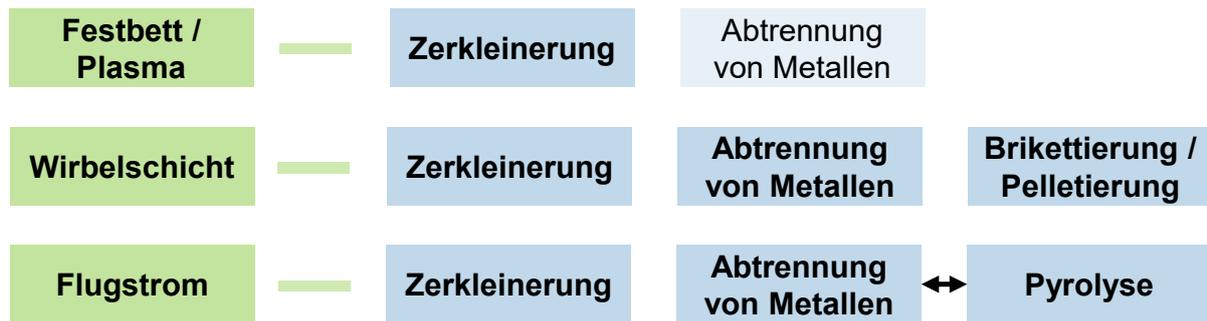


Abbildung 9-1: Vorbehandlungsschritte in Abhängigkeit vom verwendeten Verfahren; in heller Farbe Vorbehandlungsschritte, die nur evtl. notwendig sind.

### 9.1.2 Abkühlen des Produktgases

Nach der Vergasung wird das Produktgas in der Regel abgekühlt, dafür stehen prinzipiell 2-Konfigurationen zur Verfügung. Zum einen die Abkühlung über eine Quenche und zum anderen über einen Wärmetauscher. Die Quenche wird in der Regel verwendet, wenn hohe Wasserstoffkonzentrationen im Produktgas erreicht werden sollen. Der Vorteil liegt darin, dass das Produktgas nach der Quenche mit Wasserdampf gesättigt ist und damit für nachfolgende Wassergasshiftreaktionen ideale Voraussetzungen bietet. Die Quenche schließt dabei direkt an den Vergasungsreaktor an. Wärmetauscher haben im Gegensatz eine höhere Energieeffizienz, aber auch höhere Investitionskosten. Die Wärmetauscherkonfiguration wird in erster Linie eingesetzt, wenn höhere CO-Konzentrationen und hohe Kaltgaseffizienz im Produktgas erzielt werden soll. [Lui, 2010]

### Anlagenkonzept

Zum Abkühlen des Produktgases auf eine Temperatur von ca. 200°C wird mittels direkten Kontaktes mit Wasser gequencht. Die erneute Synthese von Dioxinen kann dadurch verhindert werden. Dioxine entstehen bei Temperaturen zwischen 300 und 500°C. Durch die schnelle Abkühlung hat das Produktgas diesen Temperaturbereich sehr schnell überwunden.

### 9.1.3 Gasreinigung (Partikelabtrennung und Abtrennung von HCl und HF)

Für die Entfernung von Partikeln aus dem Rohgas stehen je nach Partikelgehalt und Partikelgröße unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Je nach Einsatzstoff und Verfahren beinhaltet die Partikelentfernung nicht nur die Abtrennung von Koks, Asche und mitgerissenem Bettmaterial, sondern auch von Alkaliverbindungen. Bei Temperaturen über 800°C können diese verdampfen und sich anschließend auf kühleren Oberflächen in Downstream-Anlagenteilen

absetzen, oder direkt zu feinen Partikeln < 5 µm kondensieren. Die Abtrennung der Partikel ist eng verknüpft mit der Abtrennung von kondensierbaren Kohlenwasserstoffen.

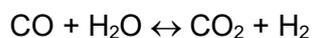
Für die Abtrennung von Partikeln sowie Chlorid und Fluorid können auch Gaswäscher verwendet werden

### Anlagenkonzept

Der Großteil der im Produktgas enthaltenen Partikeln wird bereits in der Quenche abgetrennt. Der erzeugte Wasserdampf, das Produktgas und der Staub werden anschließend in einen Gaswäscher eingetragen. Im Gaswäscher wird das Gas weiter abgekühlt und Feststoffpartikel, sowie HCl mit Wasser abgetrennt.

#### 9.1.4 Erhöhung der Wasserstoffanteils

Zur Verbesserung der Wasserstoffausbeute und der Verringerung des Kohlenstoffmonoxidgehalts wird nach dem Vergasungsprozess eine Wassergas-Shift-Einheit geschaltet. Als Wassergas-Shift-Reaktion wird die exotherme Reaktion von Kohlenstoffmonoxid mit Wasser zu Wasserstoff und Kohlendioxid bezeichnet. Dabei entsteht pro Mol Kohlenstoffmonoxid ein Mol Wasserstoff:



Die Gleichgewichtskonstante dieser Reaktion sinkt mit der Temperatur, d. h. man erreicht höhere Wasserstoffausbeuten bei niedrigen Temperaturen. Bei niedrigen Temperaturen sinkt allerdings die Reaktionsrate. In industriellen Prozessen läuft das Verfahren meist in mehreren Stufen ab.

- Stufe 1 – High-Temperature-Shift-(HTS-)Katalyse: Reduktion der CO-Konzentration von 10-13% auf 2-3% auf einem chromdotierten Magnetit-Katalysator bei einer Temperatur zwischen 350-550°C und einem Druck von über 20 bar. [Platon 2009]
- Stufe 2 – Low-Temperature-Shift-(LTS-)Katalyse: Reduktion der CO-Konzentration auf 0,2-0,4% an einem Cu/ZnO oder CoMo Katalysator bei einer Temperatur von 200-250°C und einem Druck zwischen 10 und 30 bar. [Platon 2009]

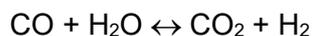
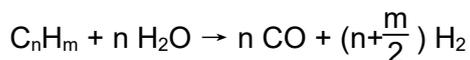
Für eine Reduzierung des Kohlenstoffmonoxidgehalts und der Anpassung des CO/H<sub>2</sub>-Verhältnissen für eine anschließende Synthese reicht eine HTS-Stufe aus.

## Anlagenkonzept

Das Anlagenkonzept sieht zur Erhöhung der Wasserstoffausbeute eine zweistufige Wassergasshiftreaktion vor. Das Produktgas muss für die erste Stufe über einen Wärmetauscher aufgeheizt werden. Da die Reaktion exotherm ist kann die Abwärme aus der Wassergasshiftreaktion zum Aufheizen des Produktgases verwendet werden. Dabei kann zusätzlich das austretende Gas auf eine Temperatur von ca. 50°C abgekühlt werden.

### 9.1.5 Dampfreformierung

Bei hohen Methangehalten im Produktgas kann in einem weiteren Schritt das Methan in Wasserstoff umgewandelt und damit die Wasserstoffausbeute erhöht werden. Die Konzentration von Methan hängt dabei von vielen Faktoren ab, wie Vergasertyp, Vergasungsmittel, Einsatzstoff, Druck, Temperatur und Verweilzeit. In erster Linie kommt die Dampfreformierung zum Einsatz, die sich durch einen hohen Gesamtwirkungsgrad und hohe Wasserstoffausbeute bei geringen Kosten auszeichnet. Längerkettige Kohlenwasserstoffe werden in Wasserstoff und Kohlenmonoxid gespalten. Eine zusätzliche Teerentfernung ist dann nicht mehr notwendig. Hauptreaktionen am Katalysator sind [GTI 2015]:



In der Regel ist eine Zugabe von Wasserdampf nicht erforderlich, da das Rohgas davon ausreichend enthält. Die Reaktion findet in Anwesenheit eines Katalysators (meist Nickel) bei Temperaturen zwischen 500°C und 900°C statt.

## Anlagenkonzept

Eine Dampfreformierung ist im Anlagenkonzept nicht vorgesehen, da die Verfahrensparameter so gewählt sind, dass nur geringe Mengen Methan im Produktgas enthalten sind.

### 9.1.6 Abtrennung von sauren Bestandteilen (CO<sub>2</sub>), Schwefelverbindungen und sonstigen Verunreinigungen

Die weitere Aufbereitung hängt von der weiteren Verwendung des Wasserstoffs und des geforderten Reinheitsgrades ab. Bei der Ammoniaksynthese muss das Kohlenstoffdioxid abgetrennt werden, um die Bildung von Carbamaten zu vermeiden. Beim Ebara Ube Prozess erfolgt

dies über eine Verdichtung und Verflüssigung. Das abgetrennt  $\text{CO}_2$  wird als Trockeneis vermarktet. [Quicker, 2019]. Der DFB-Vergaser verwendet zur Abscheidung einen Aminwäscher. Für Produktgasaufbereitung werden in der Regel chemische Lösungsmittel wie wässrige Aminlösungen verwendet. Derzeit am häufigsten eingesetzt wird dabei Monoethanolamin (MEA) und Methyldiethanolamin (MDEA). Physikalische Lösungsmittel absorbieren im Gegensatz zu den chemischen Lösungsmitteln auch Kohlenwasserstoffe. Die verbreitetsten physikalischen Lösungsmittel sind Methanol (Rectisolverfahren) und Dimethylether von Polyethylenglykol (Selexol-Verfahren). [Lui, 2010]

Tabelle 9-1 zeigt die Produktgasreinigungsverfahren und ihre Vor- und Nachteile.

Tabelle 9-1: Produktgas-Reinigungsverfahren [Lui, 2010]

Verfahren	Amin	Rectisol	Selexol
<b>Absorbens</b>	Aminlösung	Methanol	DEPE
<b>Druck (MPa)</b>	< 7	5,8	1,6 bis 7
<b>Temperatur (°C)</b>	25 bis 60	-70 bis -30	-5 bis 25
<b>Schwefel (ppm)</b>	MEA < 1 MDEA < 0,1	< 0,1	< 5
<b>Vorteile</b>	Geringe Lösemittel Kosten, $\text{CO}_2$ -Adsorption	Vollständige $\text{CO}_2$ -Entfernung, Hohe Schwefelentfernungsrates	Moderater $\text{CO}_2$ -Schlupf Moderate Kosten,
<b>Nachteile</b>	Korrosion, Schäumen, hohe Lösemittelumwälzrate, Abbau des Lösemittels	Hohe Kosten, toxisch. Niedrige Temperatur und Wärmeverluste	hohe Lösemittelumwälzrate, hoher Restschwefelgehalt

### Anlagenkonzept

Die Quenche und der Gaswäscher entfernen bereits einen Großteil der Verunreinigungen des Produktgases. Dies beinhaltet Partikel, Chlorid, Alkaliverbindungen, nicht flüchtige Metalle und einen Teil des Ammoniaks. Noch im Produktgas enthalten sind größere Mengen Kohlenstoffdioxid, Schwefelverbindungen ( $\text{COS}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ), ein Teil des Ammoniaks und geringe Mengen an  $\text{HCl}$ .

Das Anlagenkonzept sieht eine gemeinsame Abtrennung von Kohlenstoffdioxid anderen Unreinheiten, wie Schwefelverbindungen ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{COS}$ ), Ammoniak und Cyanwasserstoff (Blausäure) mittels Rectisolprozess vor. Der Rectisolprozess ist ein häufig angewendetes physikalische Gasreinigungsverfahren. Er wird meist verwendet, wenn das Gas anschließend katalytisch zu Produkten wie Ammoniak, Wasserstoff und Fischer-Tropsch-Flüssigkeiten umgewandelt wird. [Lui, 2010] Es bietet die Möglichkeit sowohl  $\text{CO}_2$  als auch Verunreinigung in getrennten Fraktionen abzutrennen. Das  $\text{CO}_2$  kann dabei in einer Reinheit abgetrennt werden, die

eine Vermarktung ermöglicht. Eventuell kann aufgrund des geringen Schwefelanteils in Textilabfällen ein anderes Verfahren zur Abtrennung der Verunreinigungen vorteilhafter sein. Das hängt von der genauen Produktgaszusammensetzung, der weiteren Verwendung des Wasserstoffs und den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab.

### 9.1.7 Reinigung des Wasserstoffs

Um hohe Reinheiten des Wasserstoffs zu erreichen ist anschließend entweder eine Druckwechseladsorption oder eine Membraneinheit notwendig. Das Druckwechseladsorptionsverfahren (Pressure Swing Adsorption) entspricht dem aktuellen Stand der Technik für die Abscheidung von Wasserstoff aus Synthesegasen in der chemischen und petrochemischen Industrie. Es beruht auf der physikalischen Bindung von Gasmolekülen auf einem festen Adsorptionsmaterial (Aktivkohle, Zeolithe, Silicagel und Aluminiumgel). Dabei können Gasgemische anhand ihrer unterschiedlichen Adsorptionseigenschaften getrennt werden. Einer der häufigsten Anwendungsfälle ist die Behandlung von Gas aus der Dampfreformierung. Dafür wird das Gas mittels einem Wassergas-Shift-Reaktor vorbehandelt, so dass das Gas typischerweise folgende Zusammensetzung hat: 70 bis 80% H<sub>2</sub>, 15 bis 25% CO<sub>2</sub>, 3 bis 6% CH<sub>4</sub>, 1 bis 3% CO und Spuren von N<sub>2</sub>. Das Eingangsgas hat im Allgemeinen einen Druck von ca. 4 bis 30 bar und eine Temperatur von 21 bis 38°C. [Sircar 2009]

Die Anlagen werden mit mindestens zwei Reaktoren betrieben, so dass sich immer ein Reaktor in der Adsorption befindet, während der zweite regeneriert wird.

Die Adsorptionsstärke der Verbindungen ist:

- Aktivkohle: CO<sub>2</sub> > CH<sub>4</sub> > CO > H<sub>2</sub>.
- Zeolithe: CO<sub>2</sub> > CO > CH<sub>4</sub> > N<sub>2</sub> > H<sub>2</sub>

Die Adsorption findet bei hohem Druck statt. Zur Desorption wird der Druck anschließend abgesenkt, sodass der Adsorber wiederverwendet werden kann. Das Verfahren ermöglicht die Gewinnung eines trockenen hochreinen Gases (98-99,999 mol-%). Die grundsätzlichen Verfahrensschritte sind Adsorption unter Druck, Desorption bei niedrigem Druck, Spülen und Druckausgleich mit einem anderen Behälter. Neben der Gewinnung von hochreinem Wasserstoff kann die Druckwechseladsorption so erweitert werden, dass die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid ermöglicht wird.

Im Gegensatz zur zyklisch ablaufenden Druckwechseladsorption ist das Membranverfahren ein kontinuierlicher Prozess. Welches Verfahren besser geeignet ist, ist stark von der Menge an aufzubereitendem Gas abhängig. Bei großen Anlagen ist das Druckwechseladsorptionsverfahren meist wirtschaftlicher. Bei etwa gleichbleibender Gaszusammensetzung ist die

Steuerung von Membranverfahren in der Regel sehr einfach und besteht aus der Kontrolle der Membrantemperatur, Gaseingangsdruck und Permeatdruck.

### Anlagenkonzept

Das Anlagenkonzept sieht eine weitere Aufbereitung mit Druckwechseladsorption vor.

#### 9.1.8 Prozessbeschreibung (theoretisches Anlagenkonzept)

Folgend ist ein beispielhaftes Anlagenkonzept mit einer 2-stufigen Wirbelschichtvergasung dargestellt.

Für das Anlagenkonzept wurden folgende Randbedingungen definiert:

- Aufgrund der aufwendigen Gasaufbereitung ist eher von größeren zentralen Anlagen auszugehen.
- Der Prozess soll für mind. 70.000 t/a an gemischten Textilabfällen geeignet sein, die Anlage ermöglicht den Einsatz von weiteren Abfallströmen in Form einer Co-Vergasung
- Die Zusammensetzung des Textilabfalls orientiert sich an den in Kapitel 5 dargestellten Daten
- Bewährte Technologie soll soweit möglich eingesetzt werden
- Der Prozess endet bei der Abtrennung des Wasserstoffs

Abbildung 9-2 zeigt ein vereinfachtes Verfahrensschema mit den wichtigsten Verfahrensteilen:

- Vorbehandlung (Zerkleinerung, Metallabtrennung und Brikettierung)
- Niedrigtemperaturwirbelschichtvergasung (600 bis 800°C)
- Hochtemperaturwirbelschichtvergasung (1.300 bis 1.500°C) mit direkt angeschlossener Quenche
- Gaswäscher zur Abtrennung von HCl, HF und Partikeln
- Wassergasshiftreaktor
- Methanol-Adsorptionsverfahren
- Druckwechseladsorption

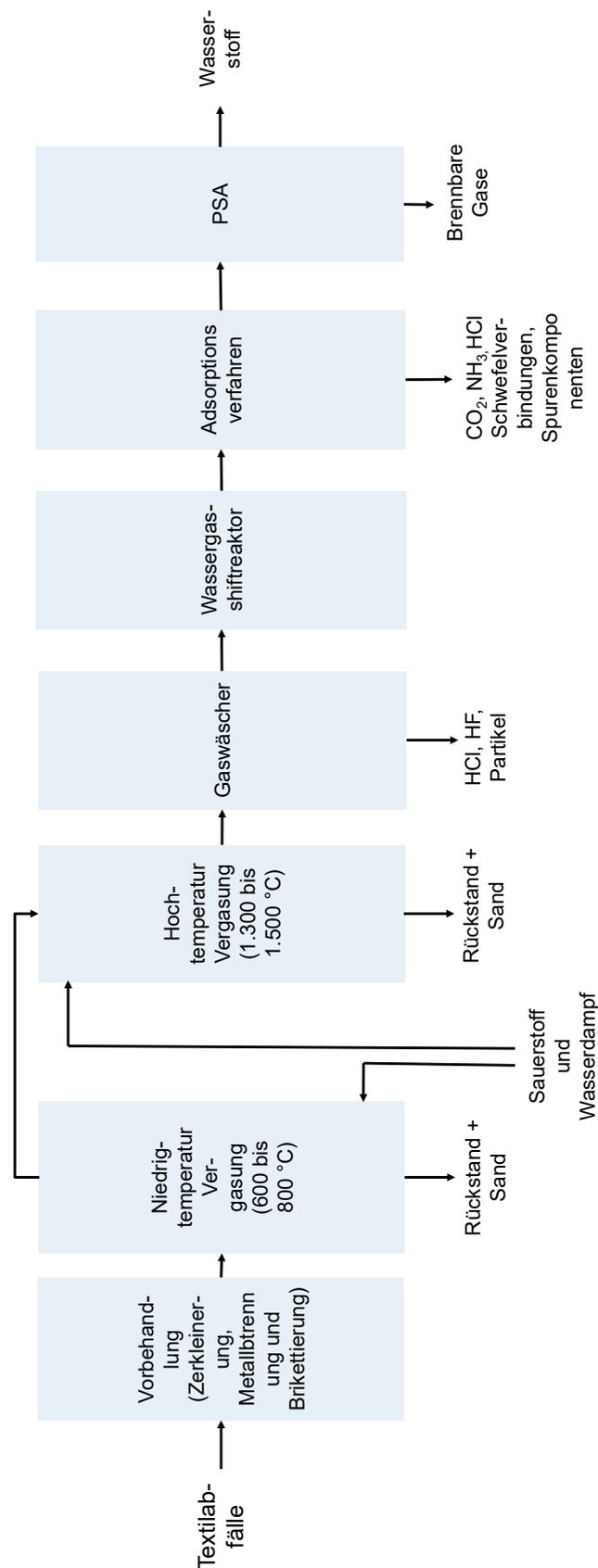


Abbildung 9-2: Vereinfachte Darstellung einer Anlage zur Herstellung von Wasserstoff aus Textilabfällen

## 9.2 Machbarkeit

### 9.2.1 Technische Machbarkeit

Prinzipiell ist die thermochemische Umwandlung von Textilabfällen technisch machbar. Die im Anlagenkonzept verwendeten Aggregate sind bereits oft im Einsatz. Tab. 9.2 zeigt die Verfahrensschritte mit dem jeweiligen TRL. Die Gasreinigungsschritte und die Vorbehandlung sind dabei bereits vielfältig im Einsatz und entsprechen dem aktuellen Stand der Technik. Wirbelschichtvergasungsreaktoren sind für Biomasse (z. B. Hackschnitzel) bereits im Einsatz und haben prinzipiell ebenfalls eine hohe technische Entwicklungsstufe erreicht. Für Textilabfälle sollten jedoch vor einer großtechnischen Realisierung noch Untersuchungen im Pilotmaßstab erfolgen. Ziel sollte es sein die optimalen Verfahrensparameter, wie Temperatur, Verweilzeit und Vergasungsmittel (Sauerstoff und Wasserdampf) zu Einsatzstoff-Verhältnis. Auch die genaue Produktgaszusammensetzung ist wichtig zur Auslegung der nachfolgenden Aggregate.

Tabelle 9-2: Verfahrensschritte mit Technologiereifegrad (TRL)

Verfahrensschritt	TRL	Anmerkung
Vorbehandlung	TRL 9	Stand der Technik; Bereits vielfältig im Einsatz
Niedrigtemperaturvergasung	TRL 7 bis 8	Prinzipiell für andere Einsatzstoffe bereits vielfältig im Einsatz; Textilabfälle wurden bisher jedoch nur selten betrachtet
Hochtemperaturvergasung mit Quenche	TRL 7 bis 8	Prinzipiell für andere Einsatzstoffe bereits vielfältig im Einsatz; Textilabfälle wurden bisher jedoch nur selten betrachtet
Gaswäsche	TRL 9	Stand der Technik; Bereits vielfältig im Einsatz
Wassergasshiftreaktor	TRL 9	Stand der Technik; Bereits vielfältig im Einsatz
Rectisolverfahren	TRL 9	Stand der Technik; Bereits vielfältig im Einsatz
Druckwechseladsorption	TRL 9	Stand der Technik; Bereits vielfältig im Einsatz

### 9.2.2 Wirtschaftliche Machbarkeit

Wie im Abschnitt 9 beschrieben ist die Umsetzung einer wirtschaftlichen Anlage für die Textilvergasung als realistisch einzustufen. Das hier vorgelegten Anlagenkonzept für die thermochemische Umsetzung von Textilabfällen unterscheidet sich zwar in einigen Punkten, so entfällt der Punkt der Reaktion und Destillation, die Vergasung läuft 2-stufig ab und die Abtrennung des Wasserstoffs über PSA fehlt, die Ergebnisse sind aber dennoch übertragbar. Zu beachten ist, dass die Gasaufbereitungsschritte einen Großteil der Investitionskosten

ausmachen (Abbildung 9-3). Allgemein lässt sich sagen, dass der Vergaser nur ca. 10% bezogen auf die Investitionskosten einer Anlage zur Wasserstoffherstellung ausmacht.

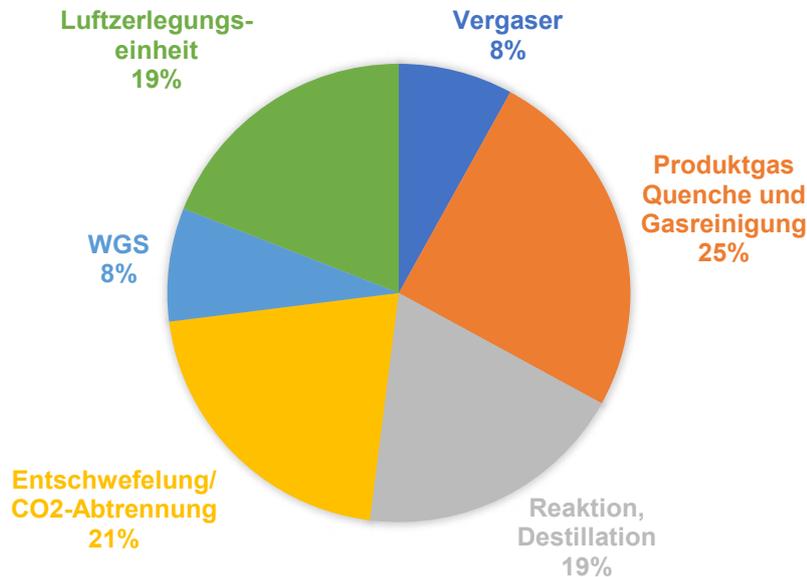


Abbildung 9-3: Typische Investitionskosten (%) einer 200 kt/a Methanolproduktionsanlage, mit Kohlevergasung (WGS = Wassergasshift) [eigene Darstellung nach Lui 2010]

Von den großtechnischen Anlagen, die bereits im Betrieb sind, entspricht das Anlagenkonzept am ehesten der Anlage von Ebara Ube (Abschnitt 8.8.1). Diese produziert seit 2003 Wasserstoff zur Ammoniaksynthese. Die wirtschaftliche Machbarkeit für die Vergasung von Abfällen konnte in Europa noch nicht demonstriert werden.

Einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hat der Wasserstoffpreis. Nach dem DIHK-Faktenpapier Wasserstoff [DIHK, 2020] bestimmen die folgenden Faktoren maßgeblich die Gestehungskosten für Wasserstoff

- Herstellungsart (grün, grau, blau, türkis, etc.)
  - lokal anfallenden Stromkosten
  - Kosten der Energieträger
  - Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien
- Auslastung der Erzeugungsanlagen
- Wasserverfügbarkeit
- In der Bewertung der Verfügbarkeit von Technologien kommt das DIHK-Faktenpapier, wie die Studie Hydrogen Economy Outlook von BloombergNEF [BNEF, 2020] zu dem Schluss, dass noch ein hohes, kostensenkendes Entwicklungspotenzial vorliegt. BloombergNEF konkretisiert der genannten Studie den Mangel an großtechnischen Lösungen in Entwicklung und Anwendung. Zudem werden folgende flankierende Hemmnisse benannt:

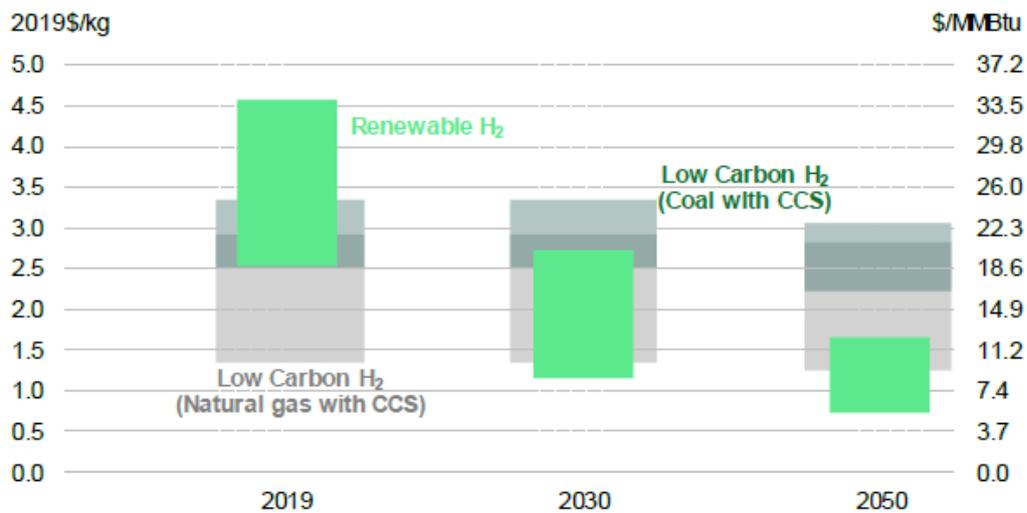
- Global unzureichende politische Unterstützung für Investitionsmechanismen und in die das Technologiereifegrad (engl. Technology Readiness Level: TRL)
- Nur geringe Unterstützung von industrieller Anwendung im Rahmen von Demonstrationsvorhaben
- Fehlen verbindlicher Emissionsstandards bzw. von Vorgaben zum Wasserstoffeinsatz in geeigneten Anwendungen innerhalb des Transportsektors
- Fehlen von Anreizen und Märkten zur Produktion emissionsarmer Produkte (Stahl, Zement, Dünger, Kunststoffe)
- Fehlen langfristiger, verbindlicher Pfade zur Dekarbonisierung der Industrie
- Weitere Verbreitung und Standardisierung von Wasserstofftechnologien

Mit der breiten Nutzung von Wasserstoff auf Basis geänderter Marktmechanismen und sich wandelnder handlungspolitischer Rahmenbedingungen kann auch die erforderliche Technologie in ihrem Preis sinken.

Neben der Verfügbarkeit und Bezahlbarkeit von Technologien zur Produktion und Nutzung von Wasserstoff kommt, auch in der Kostenbewertung dem Transport und der Lagerung von Wasserstoff eine zentrale Bedeutung bei. Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff benötigt seine Lagerung nach BNEF drei- bis viermal so viel Lagerungsinfrastruktur wie Erdgas. Wegen der möglichen, dreimal höheren Fließgeschwindigkeit kann Wasserstoff hingegen in speziellen Leitungsnetzen verdichtet, gut transportiert werden. Diese Lösung ist in mittlerem bis großen Transportumfang bei Entfernungen bis 4.000 km Entfernung dem Schifftransport von Ammoniak kostenseitig überlegen. In kleinen Mengen kann Wasserstoff über Lkw in komprimierter Form noch vergleichsweise günstig transportiert werden.

Ein zentraler Mechanismus zur Schaffung einer konkurrenzfähigen Wasserstoffwirtschaft wird in der CO<sub>2</sub>-Bepreisung gesehen. Für das Jahr 2050 prognostizieren die Ersteller von BNEF 2020 einen Grenzpreis von ca. 50 \$/t\*CO<sub>2</sub> für den Einsatz von Wasserstoff in der Stahlerzeugung, 60 \$/t\*CO<sub>2</sub> für die Herstellung von Zement und 80 \$/tCO<sub>2</sub> für die Ammoniaksynthese.

Langfristig könnte der Preis für großindustriell erzeugten grünen Wasserstoff nach BNEF 2020 von derzeit maximal 4,5 \$/kg auf unter 1,0 \$/kg im Jahr 2050 fallen und somit das heutige günstigste Angebot für blauen Wasserstoff (erdgasbasiert mit CCS: engl. Natural gas with CCS) unterschreiten (Abbildung 9-4). Bereits 2030 wird nach der vorliegenden Studie von einer Konkurrenzfähigkeit von grünem zu blauem Wasserstoff aus Erdgas ausgegangen. Der Preis für beide Erzeugungsarten wird in einem Preisbereich von 1,2 bis 2,8 \$/kg (grün) bzw. 1,4 bis 2,5 \$/kg (blau, auf Erdgasbasis) erwartet.



Source: BloombergNEF. Note renewable hydrogen costs based on large projects with optimistic projections for capex. Natural gas prices range from \$1.1-10.3/MMBtu, coal from \$30-116/t.

Abbildung 9-4: Langfristige Preisprognose für Wasserstoff (H<sub>2</sub>) nach BNEF 2020  
 Renewable H<sub>2</sub> = grüner H<sub>2</sub>– Coal with CCS, Natural gas with CCS = blauer H<sub>2</sub> aus Kohle oder Erdgas.

### 9.2.3 Herausforderungen

Folgende Hürden und Herausforderungen sind zu benennen:

- Die Machbarkeit der Technologie in der Anwendung „Textilabfälle zu Wasserstoff“ ist nicht-belegt. Es fehlen großtechnische Referenzanlagen vorzugsweise in Europa.
- Die Akzeptanz der Vergasungstechnologie in der Bevölkerung ist wesentlich für Realisierungen an konkreten Standorten, zumal Genehmigungsverfahren in aller Regel Öffentlichkeitsbeteiligungen beinhalten.
- Genehmigungsprozesse für große Vergasungsanlagen können sich aufwändig und langwierig gestalten.
- Im Bereich der rechtlichen Einstufung von Wasserstoff aus Abfall gilt es folgende Aspekte zu klären.
  - Die Einstufung von Abfall als Rohstoff als
    - grüner Wasserstoff, oder
    - oranger Wasserstoff (separate Kategorie, vgl. Wencker 2021).
  - Die Anrechnungsmodalitäten zur THG-Vermeidung bei Nutzung von grünem Wasserstoff.
  - Die Möglichkeit zur Einstufung der Vergasung zur Wasserstoffherzeugung als Weg der stofflichen Nutzung (vgl. § 3 Absatz 23a KrWG).

#### 9.2.4 Eingliederung der Vergasungstechnologie ins Textilrecycling

Vergasungstechnologien eignen sich vor allem für gemischte Textilabfälle, bei denen ein stoffliches Recycling nicht möglich ist. Die Produktion von Wasserstoff als Treib- oder Brennstoff wird aktuell nicht als stoffliches Recyclingverfahren angesehen [Europäische Kommission, 2021]. Für ein stoffliches Recycling muss der Wasserstoff anschließend als Einsatzstoff in der chemischen Industrie verwendet werden. Dabei können sich zusätzlich Synergien ergeben, wenn beispielsweise der in der Luftzerlegung anfallende Stickstoff zur Ammoniaksynthese genutzt wird.

Der Energieverbrauch von Vergasungstechnologien ist aufgrund der hohen Temperaturen sehr hoch. Zusammen mit den erforderlichen Gasreinigungs- und Aufbereitungsschritten ist die zu erwartende Umweltbelastung des Verfahrens höher als bei mechanischen oder thermomechanischen Recyclingverfahren. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass aktuell nicht alle Textilabfälle für ein stoffliches Recycling geeignet sind. Das bei einer Vergasung evtl. freigesetzte CO<sub>2</sub> wird dabei bei jeglicher Art der thermischen Verwertung freigesetzt. Ziel sollte es sein von einer Verbrennung auf eine höherwertige Form der Verwertung zu wechseln. Die Vergasungsverfahren bieten die Möglichkeit das CO<sub>2</sub> in einer Reinheit zu gewinnen, dass eine Vermarktung möglich ist. Zu Vergasungsverfahren gibt es aktuell keine LCI-Daten. Verglichen mit der Synthesegasproduktion aus Kohle oder Erdgas kann eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von 50% erreicht werden. [Europäische Kommission, 2021]

Vorteile des Verfahrens liegen vor allem darin, dass es für heterogene und gemischte Abfälle geeignet ist. Eine aufwändige Vorsortierung und Abtrennung von Verunreinigung sind dabei nicht notwendig. Es kann damit bestehende Recyclingverfahren ergänzen. Aufgrund der Flexibilität des Verfahrens ist darüber hinaus auch eine gemeinsame Verwertung mit anderen Reststoffen wie Biomasse und Kunststoffen in Form einer Co-Vergasung möglich.

Vergasungsverfahren haben einen hohen technischen Reifegrad mit mehreren großtechnischen Anlagen.

## 10 Analyse zur Textilsammlung und Logistik

### 10.1 Logistikanalyse

#### 10.1.1 Altkleidersammlung

Aus der Bevölkerungsverteilung in Bayern nach Ortslagen wurde auf die Verteilung des Altkleideraufkommens geschlossen. Abbildung 10-1 zeigt dies in einer Heatmap-Darstellung. Das bevölkerungsgewichtete Zentrum Bayerns liegt nordwestlich von Ingolstadt (grüner Punkt in der Karte). Einfluss auf dessen Lage nimmt die starke Verdichtung der Bevölkerung auf die Ballungsräume München, Nürnberg und Augsburg sowie eine starke Bevölkerungsansammlung im Westteil des Freistaats.

Parallel zur Bevölkerungsentwicklung hat sich in den Verdichtungsräumen auch die Infrastruktur entwickelt, so dass eine gute Verkehrsanbindung innerhalb der urbanen Zentren und unterhalb der großen und mittleren Lokalzentren besteht. Die Ansiedlung einer auf Bayern beschränkten, zentralen Behandlung von Alttextilien wäre im Umfeld der Mittelzentren sinnvoll, insbesondere im Großraum Ingolstadt. Eine auf die angrenzenden deutschen Bundesländer ausgeweitete Betrachtung wäre für eine stärkere Bündelung von geeigneten Textilmengen zielführend.

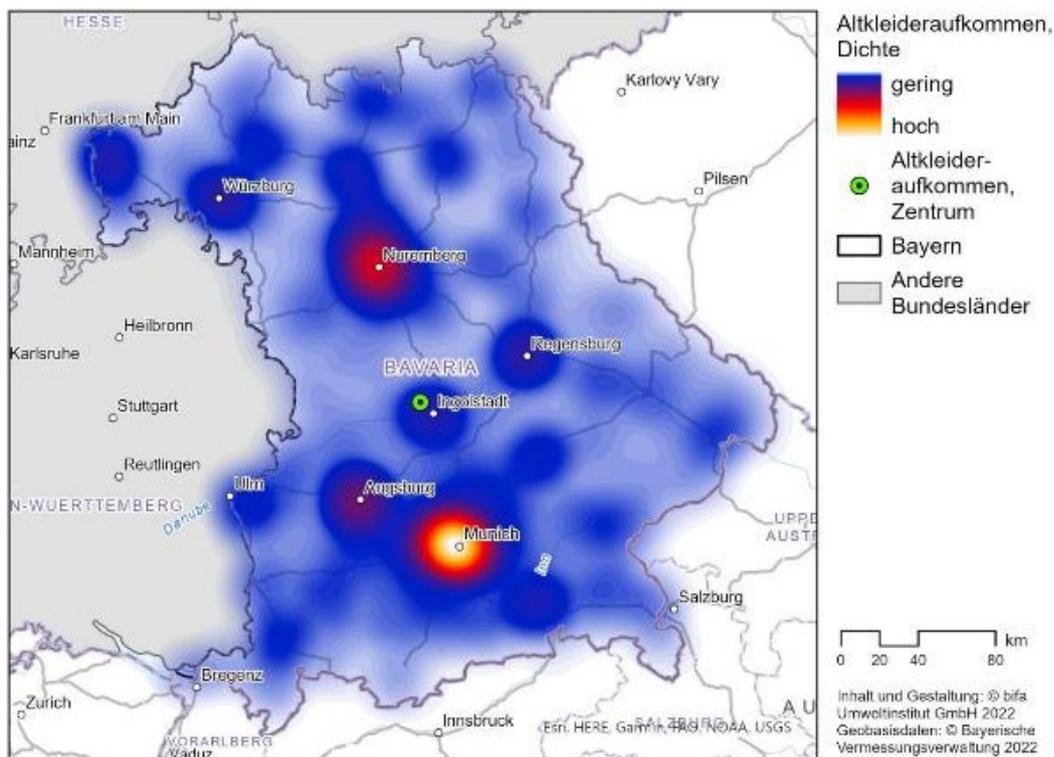


Abbildung 10-1: Hochrechnung der Verteilung des Altkleideraufkommens innerhalb Bayerns

### 10.1.2 Entsorgungsfachbetriebe für Textilabfälle

In Abbildung 10-2 sind alle 133 bayerischen Entsorgungsfachbetriebe verzeichnet, die aktuell Textilabfälle behandeln, verwerten oder beseitigen dürfen. Dies umfasst folgende Abfallschlüssel:

- AVV 04 02 Abfälle aus der Textilindustrie
  - AVV 04 02 09 Abfälle aus Verbundmaterialien (imprägnierte Textilien, Elastomer, Plastomer)
  - AVV 04 02 21 Abfälle aus unbehandelten Textilfasern
  - AVV 04 02 22 Abfälle aus verarbeiteten Textilfasern
- AVV 15 01 09 Verpackungen aus Textilien (einschließlich getrennt gesammelter kommunaler Verpackungsabfälle)
- AVV 19 12 08 textile Abfälle aus der mechanischen Behandlung von Abfällen (z. B. Sortieren, Zerkleinern, Verdichten, Pelletieren)
- AVV 20 01 11 Siedlungsabfälle: getrennt gesammelte Textilfraktion (ohne 150109)

Die Standortverteilung insbesondere der Anlagen zur Verwertung oder Beseitigung stimmt gut mit der Bevölkerungsverteilung im Freistaat überein. Die Anlagen können zudem als verkehrsseitig gut angebunden gelten. Reine Behandlungsanlagen (Anzahl: 77 von 133) sind teilweise auch abseits lokaler Zentren und Fernstraßenverbindungen zu finden. An 61 von 133 dieser Standorte können auch Siedlungsabfälle verwertet werden. An acht Standorten werden ausschließlich Abfälle aus der Textilindustrie behandelt. Abbildung 10-2 zeigt die örtliche Verteilung der Entsorgungsfachbetriebe. Anlagen zur Verwertung oder Beseitigung von Textilabfällen konzentrieren sich innerhalb Bayerns in Schwaben und dem nördlichen Teil Oberbayerns sowie in Unterfranken.

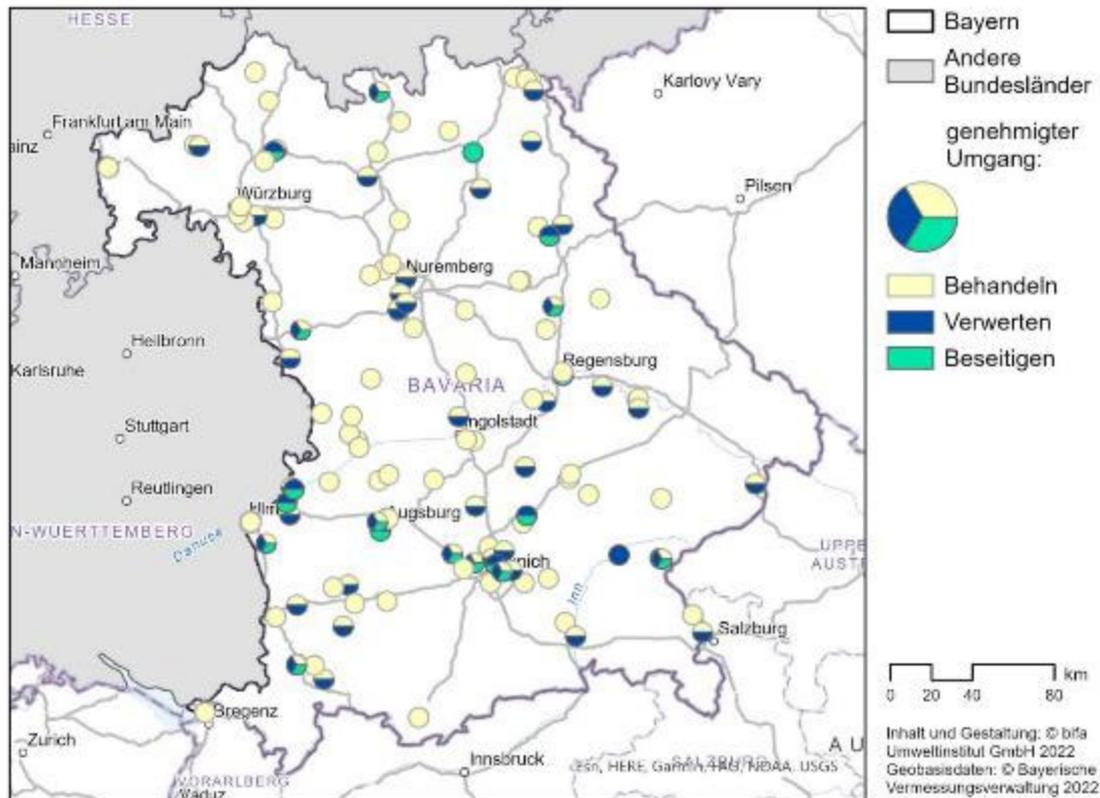


Abbildung 10-2: Standorte von Entsorgungsfachbetrieben mit einer abfallrechtlichen Genehmigung für alle Arten von Textilabfällen in den Abfallschlüsselbereichen: 04, 15, 19 oder 20

In Tabelle 10-1 sind die Entsorgungsfachbetriebe nach Genehmigungsstatus und zugehörigen Abfallschlüsselnummern statistisch ausgewertet. Über die Kapazitäten und Durchsätze dieser Anlagen, sowie deren Aufschlüsselung nach Abfallart liegen keine Informationen vor, die eine flächendeckende Zuordnung auf Textilabfälle zulassen.

Von 133 Anlagen sind 77 reine Behandlungsanlagen. Hauptsächlich verfügen diese Anlagen über eine Genehmigung zur Behandlung von textilen Siedlungsabfällen (AVV 20 01 11) und Abfällen aus der Textilindustrie (AVV 04 02). Teilausgangsströme dieser Anlagen gelangen vorbehandelt (z. B. sortiert) in unbekanntem Ausmaß zu Anlagen zur Beseitigung oder Verwertung. Aus Ihnen könnten zukünftig auch Abfallströme in eine oder mehrere Textilvergasungsanlagen gelangen.

An 56 Anlagenstandorten dürfen textile Abfälle verwertet oder beseitigt werden. An 55 dieser Anlagen ist eine Verwertung zugelassen. Nur eine Anlage ist eine reine Beseitigungsanlage. An 23 Standorten ist eine parallele Beseitigung statthaft. Diese Standorte erreichen heute Abfälle zur Beseitigung und an diesen Standorten fallen im Rahmen der Verwertung von Abfällen potentiell Reststoffe an, die auch in eine Vergasungsanlage verbracht werden könnten. Insbesondere die textilen Sortierreste der Abfallbehandlungsanlagen (AVV 19 12 08) ist spätestens nach einer Nachsortierung (32 Anlagen) stofflich nur noch in geringem Umfang nutzbar und

wird thermisch verwertet oder beseitigt (24 Anlagen). Dieser Stoffstrom ist somit für eine Erzeugung von Wasserstoff sinnvoll einsetzbar. Tabelle 10-1 zeigt die unterschiedlichen Verfahren (Behandeln, Verwerten, Beseitigen) innerhalb der Standorte der Entsorgungsfachbetriebe für alle Kombinationen von vorkommenden sechsstelligen Abfallschlüsselnummern (AVV). Dies erlaubt eine präzisere Unterscheidung der industriellen Textilabfälle. 22 Anlagen behandeln, verwerten oder beseitigen exklusiv Abfälle aus der Textilindustrie (AVV-Abschnitt 04). Hier werden überwiegend wenig bis kaum gemischte Textilabfälle angeliefert. In nahezu der Hälfte der Anlagen (61/133) werden Abfälle aus verarbeiteten Textilfasern (AVV 04 02 22) zusammen mit Verpackungen aus Textilien (AVV 15 01 09) angenommen. Bei den hier vorliegenden Textilien ist von einer höheren Durchmischung und Verschmutzung auszugehen. An rund 30% aller Standorte (36 von 133) besteht die Genehmigung, jedwede Textilabfälle einem Verfahren zu unterziehen (AVV-Abschnitt 04, 15, 19, 20). An diesen Standorten dürften aktuell die höchste Sortenvielfalt und Verschmutzung von Textilabfällen vorliegen. Je höher die Sortenvielfalt und Verschmutzung ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit einer späteren energetischen Nutzung von Teilströmen. Gleichzeitig sinkt an diesen Anfallorten die Eignung für die Wasserstoffherzeugung über einen Vergasungsprozess.

Tabelle 10-1: Anzahl der bayerischen Entsorgungsfachbetriebe nach Genehmigungsstatus

nach Verfahren und Verfahrenskombinationen								ohne Einschränkung
behandeln	x	x	x	x				122
verwerten		x		x	x	x		55
beseitigen			x	x		x	x	23
unter Einbezug der Abfallschlüsselnummern								gesamt
04 02	45	25	-	9	1	5	1	86
15 01 09	37	9	-	9	1	4	1	61
19 12 08	32	9	-	10	-	5	-	56
20 01 11	61	13	-	12	-	7	-	93
<b>gesamt</b>	<b>77</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>13</b>	<b>1</b>	<b>9</b>	<b>1</b>	<b>133</b>

An 24 Anlagenstandorten in Bayern werden textile Sortierreste aus der Abfallbehandlung verwertet oder beseitigt. In Tabelle 10-2 sind diese blau hervorgehoben. Die Aufschlüsselung erfolgt in der Tabelle nach textilen Abfalltypen, Unterscheidung in AVV-Abschnitt und Gruppen sowie deren Kombinationen. Dunkelblau hervorgehoben sind Standorte zur Verwertung. Insbesondere dort wo eine thermische Entsorgung stattfindet, bietet sich eine Nutzung dieser Abfallmengen für die Wasserstoffherzeugung an.

Tabelle 10-2: Verfahren an Standorten der bayerischen Entsorgungsfachbetriebe zum Umgang mit Textilabfällen.

AVV-Abschnitt	Abfallschlüsselnummer						Verfahren und Verfahrenskombinationen						
	04 02 09	04 02 21	04 02 22	15 01 09	19 12 08	20 01 11	Behandeln	Verwerten	Beseitigen	Verwerten oder Beseitigen	Behandeln, Verwerten oder Beseitigen		
04							4					4	22
							16	16		16	16	16	
							2					2	
04, 15							2	1		1		2	12
							3	2	2	2	6	4	
									1	1		1	
							4	2		2		5	
04, 15, 19, 20							20	11	6	11	16	20	36
							2				2	2	
							7	2	1	2		8	
							5	3	2	3		6	
04, 15, 20							3					3	13
							3					3	
							3	2	2	2	2	4	
							3					3	
04, 19, 20						2	1	1	1	1	1	3	
19						5	2	1	2	2	2	6	
19, 20						10	5	4	5	5	5	11	
20						28	8	3	8	8	8	30	
						gesamt	122	55	23	56	56	133	

### 10.1.3 Textilhersteller und -veredler

Abbildung 10-3 zeigt eine Karte der Standorte von Unternehmen, die gemäß IHK-Angaben in ihrer Schwerpunkttätigkeit mit der Herstellung oder Veredelung von Textilien beschäftigt sind. Die Standortmarker sind nach der Anzahl der Mitarbeiter in ihrer Größe unterschieden. Verdichtungsräume sind mit blauen Ellipsen umfasst. Blaue, gestrichelte Linien markieren linienartige Ansammlungen. Der Durchmesser der Standortmarker repräsentiert die Mitarbeiterzahl. Pauschalisiert wird angenommen, dass sich mit steigender Mitarbeiterzahl die Menge an verarbeitetem Material und somit die Menge an Produktionsresten erhöht.

Die höchste Dichte und stärkste Ansammlung großer Unternehmen finden sich in Franken, insbesondere im Raum Bayreuth-Hof. Somit weicht die Produktionskonzentration im Nordosten von der Bevölkerungsverteilung deutlich ab. Eine weitere Verdichtung ist im Gebiet Aschaffenburg festzustellen. In größerem Umfang besteht eine weitere Konzentration von

Erzeugungskapazität im Umkreis Würzburg-Nürnberg. Diese drei Verdichtungsräume sind jeweils mit einer blauen Ellipse gekennzeichnet. Weitere, weniger stark ausgeprägte Ansammlungen von Unternehmen finden sich entlang der Achse Ulm-Regensburg sowie der Achse Kempten-Passau. Diese linienartigen Ansammlungen sind jeweils mit blauen, gestrichelten Linien gekennzeichnet.

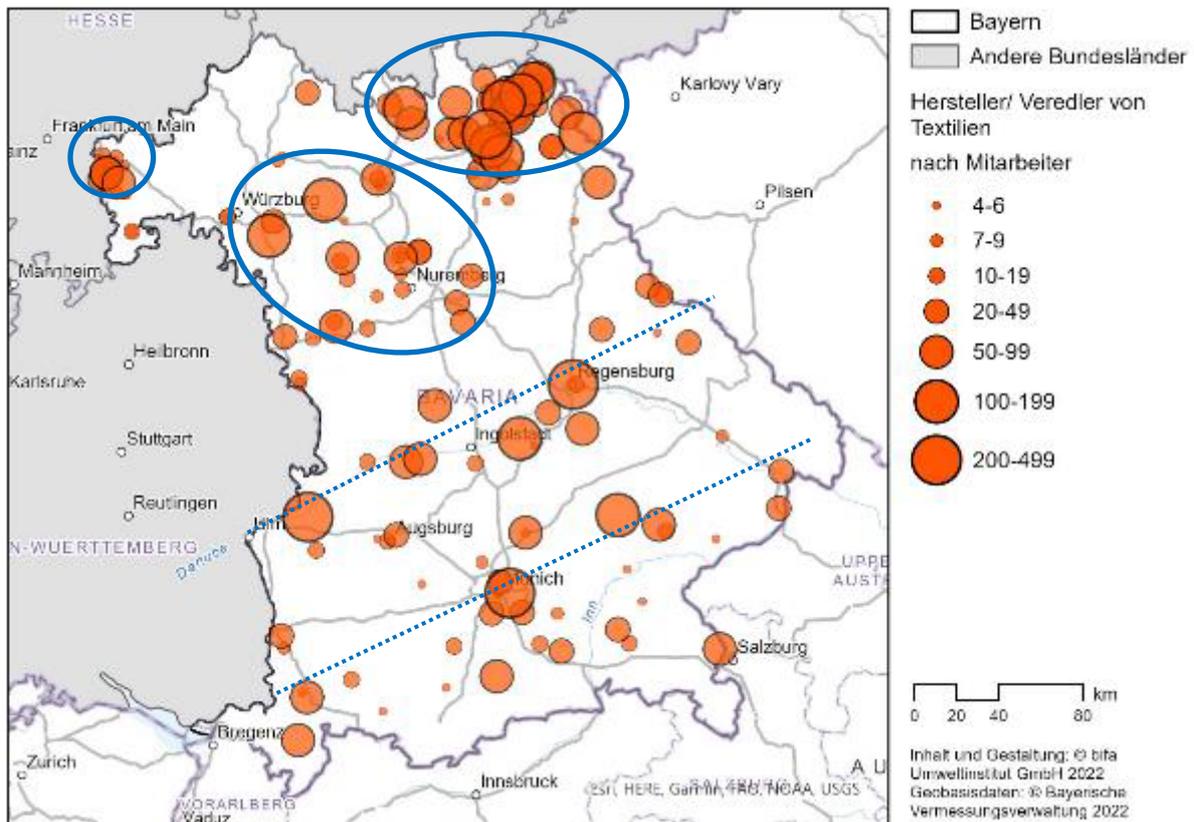


Abbildung 10-3: Standorte von Textilunternehmen mit potenziellem Produktionsrestaufkommen.

#### 10.1.4 Abgleich der Standorte der Herstellung und der Entsorgung

Da sich die Produktionskapazitäten (Abbildung 10-4) im Nordosten von Bayern konzentrieren ist – unter der Annahme einer Abfallbehandlung innerhalb Bayerns – mit einem Transportbedarf Richtung Südwesten zu rechnen. Eine Entsorgung über Anlagen in anderen Bundesländern kann alternativ angenommen werden.

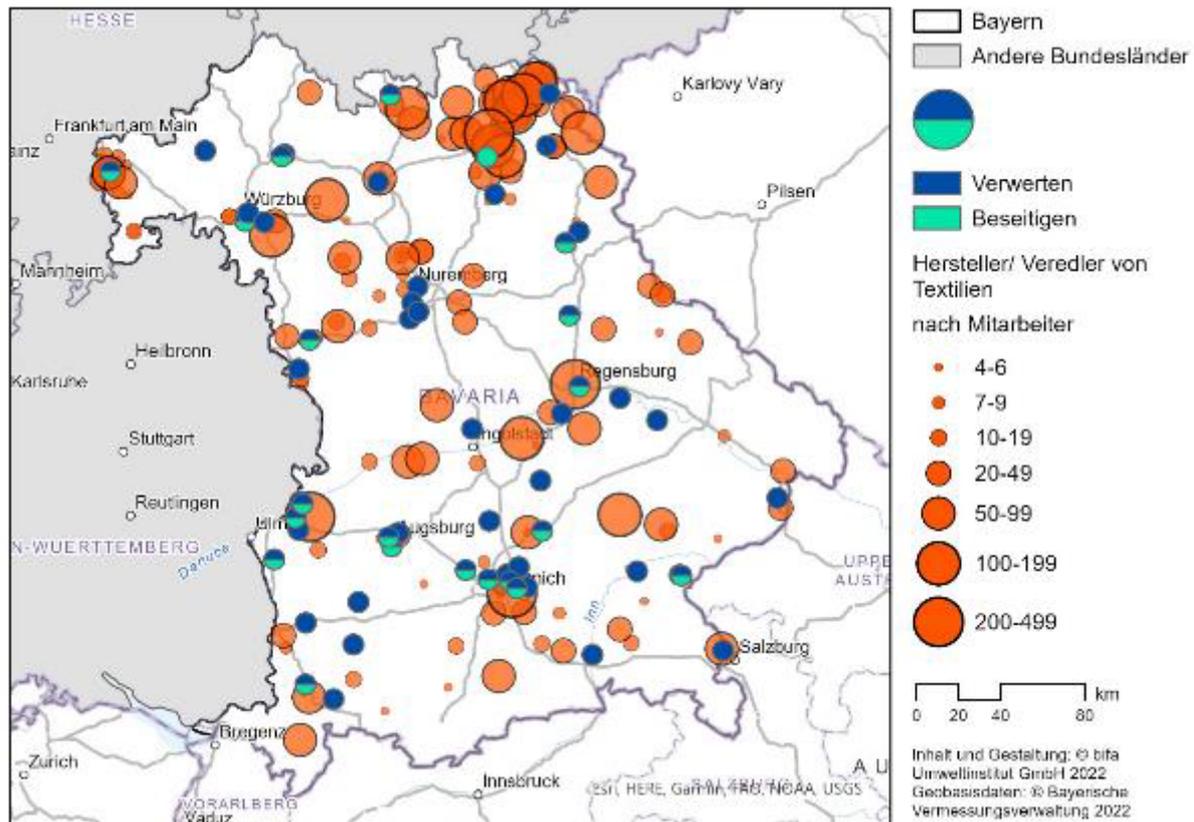


Abbildung 10-4: Gegenüberstellung der räumlichen Verteilung von Standorten zur Herstellung und Entsorgung von Textilien innerhalb Bayerns.

## 10.2 Standortuntersuchung

Zur Identifikation geeigneter Standorte wurden geographische Netzwerkanalysen durchgeführt. Hierbei wurden die Standorte von bestehenden Textilabfallverwertungsanlagen als Ziel einer Lkw-Fahrstreckenanalyse herangezogen. Bedarfspunkte waren die nach Mitarbeiterzahl gewichteten Standorte von Textilherstellern oder -veredlern. In der in Abbildung 10-5 dargestellten Standortzuweisung werden zwei Lösungsbeispiele abgebildet: der Aufbau einer zentralen Entsorgungsanlage für alle bayerischen Produzenten und die lokale Bündelung von Mengen an drei Standorten. Eine Zentralanlage wäre fahrstreckenbezogen am ehesten in Nürnberg aufzubauen, insbesondere wenn die Mengen aus dem Raum Bayreuth-Hof innerhalb Bayerns behandelt werden sollen und nicht nach Thüringen oder Sachsen verbracht werden. Der Aufbau dreier lokaler Zentralen käme im Umfeld von München, Bayreuth und Würzburg in Betracht und würde den Fahraufwand deutlich reduzieren.

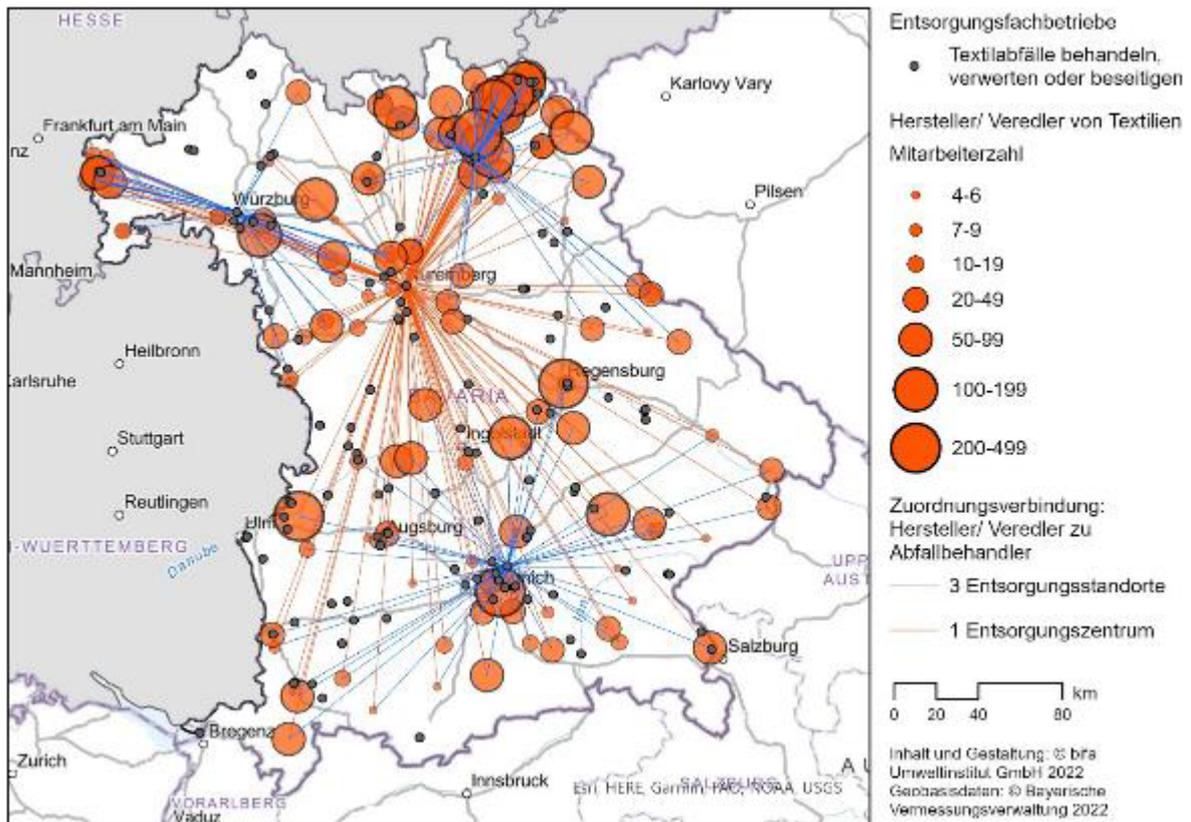


Abbildung 10-5: Fahrstreckenoptimierte Standortzuweisung von Textilabfallproduzenten auf Entsorgungsfachbetriebe für Textilien

## 11 Ausblick: Recycling-Hub Augsburg

### 11.1 Umsetzung Kompetenzzentrum

Basierend auf einem deutlich stärker werdenden Bewusstsein für eine nachhaltigere Lebensweise insbesondere in der jüngeren Bevölkerung, gewinnt die Frage der besseren Rohstoffnutzung und der Aufbau einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft auch für die Textilwirtschaft zunehmend an Bedeutung. Allerdings fehlen vor dem Hintergrund der sehr schlechten Zahlen für die Verwertung von Alttextilien erprobte und auf industrielle Maßstäbe skalierbare Konzepte für verschiedene aufeinander aufbauende Verwertungskonzepte.

Zum einen müssen sich die verschiedenen Verwertungskonzepte an den allgemein geltenden Grundsätzen der Verwertung orientieren, die sich in der sog. Abfallhierarchie ausdrücken. Nach dieser auch im geltenden Kreislaufwirtschaftsgesetz verankerten Strategie wird eine eindeutige Rangfolge für die verschiedenen Maßnahmen zum Umgang mit Abfall festgelegt.

Zum anderen wird auch das sich ändernde Verbraucherverhalten zu einer stärkeren Nachfrage an nachhaltig produzierten Textilien führen, die sich in einer deutlichen Zunahme an neuen kreislauforientierten textilen Produkten äußern wird.

Wie bereits geschildert wird der Umsetzungsdruck für eine Kreislaufwirtschaft deutlich zunehmen.

- Jedoch sind die **Konzepte für die Umsetzung bisher noch nicht klar** und viele Teile der textilen Wirtschaft sind von einer Realisierung einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft noch weit entfernt.
- Das notwendige **Wissen** um die Faktoren, die für eine Realisierung der Kreislaufwirtschaft notwendig ist, ist bei wesentlichen Stakeholdern **noch nicht vorhanden**.
- **Textile Fertigungsprozesse** sind sehr **komplex** und von vielen Einflussfaktoren und einer vielstufigen Prozessfolge geprägt, so dass insbesondere dem textilen Handel und den Verbrauchern die Zusammenhänge einer Wiederverwertung nicht klar sind.
- Zudem sind **erhebliche Teile der textilen Fertigungsprozesse** in eine Realisierung einer Kreislaufwirtschaft noch gar **nicht eingebunden**. Hier sind vor allem die technischen Textilien, Heim- und Bautextilien, Hygienetextilien und Smart Textiles zu nennen, die gerade für die deutsche Textilindustrie eine bedeutende Rolle spielen.
- Eine industrielle Umsetzung in den geforderten **resilienten Prozessen** ist ebenfalls **nicht vorhanden**, da vor allem eine Bewertung der unterschiedlichen Konzepte aufgrund mangelnder Erprobung noch gar nicht durchgeführt werden konnte.

- Die **Produktentwicklung** von neuartigen und gleichzeitig hochwertigen Produkten aus textilen Sekundärrohstoffen muss sich an der Harmonie aus technischer, ökonomischer und ökologischer Sinnhaftigkeit orientieren, was die Entwicklungsalgorithmen der Textiltechnik vor völlig **neue Herausforderungen** stellt.
- Angesichts dieser Situation bedarf es **neuartiger Produktentwicklungskonzepte**, die aus der Forschung für die industrielle Praxis aufbereitet werden müssen. Dies kann nur in einer engen Zusammenarbeit aller an der textilen Wertschöpfungskette beteiligten Partner geschehen, wie es z. B. in dem vom ITA und der Hochschule Augsburg im Juni 2022 neu geschaffenen Modellfabrik des Recycling Atelier Augsburg geschehen ist (an dem das bifa als Forschungspartner ebenfalls beteiligt ist).
- Im Rahmen der Umsetzung des Green Deal wurde in diesem Zusammenhang die Schaffung sog. RE-HUBs angeregt, die als Zentren des Wissenstransfers und als Reallabore für neue Technologien zu verstehen sind. Solche Kompetenzzentren sind gefordert, um die Umsetzung zu begleiten und zu beschleunigen. In den so geforderten Zentren sollen auch Synergien mit anderen technischen Trends und Entwicklungen, wie z. B. die Einbeziehung von Künstlicher Intelligenz (KI) sowie die in dieser Studie untersuchten stark an Bedeutung gewinnenden Wasserstoffnutzung realisiert werden.
- Der europäische Textilsektor besteht zwar aus großen Textil- und Bekleidungskonzernen aber auch zu 98,8% aus klein und mittelständischen Unternehmen (KMU). In Deutschland ist die Textilindustrie ebenfalls von solchen Strukturen geprägt, wobei insbesondere technische Textilien hergestellt werden. Diesen KMUs fehlen oftmals die Rahmenbedingungen um die notwendige Innovation, die sich aus neuen Technologieansätzen ergibt, umzusetzen. Kompetenzen und Kapazitäten zur Umstellung auf kreislauffähige und nachhaltige Geschäftsmodelle im Textilsektor benötigen bessere Randbedingungen und eine gezielte Förderung, um das wirtschaftliche Umstellungspotenzial freizusetzen und vom Risiko her realisieren zu können. Das Format „Mittelstand Digital“ mit seinem „Kompetenzzentrum Mittelstand 4.0 Textil vernetzt“ kann hier eine gute Vorlage für die Befähigung von KMUs im Bereich der Digitalisierung bieten, die auf den Nachhaltigkeitsbereich problemlos übertragen werden kann.

## 11.2 Standortbewertung Augsburg

Die Region Augsburg hat eine **lange textile Tradition** und war bis in die 50er Jahre des vorigen Jahrhunderts als „Manchester des Kontinents“ bezeichnet als textile Fertigungshochburg bekannt. An diese Tradition kann durch immer noch vorhandene Strukturen angeknüpft werden.

Eine weitere Kompetenz der Region drückt sich in den Kompetenzinstitutionen der **Umwelt- und Abfalltechnologien** mit dem bifa (Bayerisches Institut für Abfallwirtschaft) und dem LfU (Landesamt für Umwelt) aus, wodurch sinnvolle Anknüpfungspunkte für ein Kompetenzzentrum gegeben sind.

Mit dem ITA Augsburg und dem in Zusammenarbeit mit der Hochschule Augsburg geschaffenen **Recycling Atelier Augsburg** wurde zudem die erste weltweite Modellfabrik für Recycling geschaffen, in die in einem Partnermodell sowohl industrielle Technologiepartner der gesamten textilen Wertschöpfungskette als auch kompetente Forschungspartner (z. B. RWTH Aachen, Wuppertalinstitut und bifa Umweltinstitut GmbH) in die Entwicklung neuer textiler Produkte aus Sekundärrohstoffen eingebunden sind (Abbildung 11-1). Dies kann als zentraler Anknüpfungspunkt für ein Kompetenzzentrum angesehen werden, in dem auch neue Technologien, wie die in dieser Studie untersuchte Wasserstoffvergasung aus textilen Abfällen eingebunden werden können.

Zudem besitzt die Region Augsburg eine **hohe Zahl an modernen Forschungsinstitutionen**, die Komplementärtechnologien anbieten können und den Transfer in zahlreiche Anwendungsgebiete wie die Luft- und Raumfahrt, die Automobilzuliefererindustrie als auch die Leichtbau- und Compositebranche ermöglichen. Zu nennen sind hier neben dem bifa und dem ITA Augsburg die Universität Augsburg, die Hochschule Augsburg, die beiden Fraunhoferinstitute IGCV, sowie zwei DLR-Institute. Mit dem Innovationspark Augsburg ist auch eine leistungsfähige Forschungsinfrastruktur verfügbar.

Einen weiteren Anknüpfungspunkt stellt die hohe Präsenz an bereits **etablierten Forschungsnetzwerken** dar, mit der eine große Erfahrung im Aufbau und Betrieb von Netzwerkstrukturen gegeben ist. Zu nennen sind hier u.a. die Netzwerke um das Spitzencluster MAI Carbon sowie das kürzlich entstandene KI-Produktionsnetzwerk Augsburg. Auch das Kompetenzzentrum Mittelstand 4.0 ist als leistungsfähiges Kompetenzzentrum in der Region vertreten. Ergänzt wird dies durch sehr **aktive Verbandsstrukturen** wie den VTB (Verband der bayerischen Textilindustrie, den vbw (Verband der bayerischen Wirtschaft), Bayern Innovativ sowie das darin integrierte Cluster Mechatronik.

Ein wesentlicher Aspekt für ein Kompetenzzentrum stellt jedoch auch die **regionale Industrie** und die **vorhandene Infrastruktur** dar. Wichtige Unternehmen der Textil- und

Kunststoffindustrie, Zulieferer der Automotivebranche als auch der Luft- und Raumfahrt und Rohstoffproduzenten wie z. B. SGL-Carbon sind hier zu nennen. Wesentlich für eine Einbindung der Industrie ist jedoch auch die bereits **vorhandene Logistik des Abfalltransports** im Umfeld der wichtigen **Achse** der **A8**, der die Metropolregionen München, Augsburg, Ulm und Stuttgart verbindet sowie die 3 Chemieparcs der Region (Gersthofen, Bobingen und Langweid) dar.

Zusammengefasst lässt somit schlussfolgern, dass die Industrieregion Augsburg wesentliche Komponenten bereits besitzt, die für den Aufbau eines Kompetenzzentrums Textilrecycling notwendig sind.



Abbildung 11-1: Recycling Atelier Augsburg

## 11.3 Umsetzungsperspektiven

Als Resümee der dargestellten Herleitung von geeigneten Technologietransfers erscheint die Schaffung eines Kompetenzzentrums Textilrecycling als sehr geeignete Maßnahme um:

- Neue Technologien wie die in dieser Studie untersuchte Vergasung von textilen Abfällen zur Wasserstoffgewinnung im Pilotmaßstab zu realisieren
- Die bereits im Aufbau befindlichen Strukturen des Textilrecyclings rund um das Recycling Atelier Augsburg zu einem technologieübergreifenden Zentrum für textile Kreislaufwirtschaft auszubauen
- Technologiebenchmarking und -bewertung für neue Technologien des Recyclings zu ermöglichen
- Synergetische Aktivitäten der anderen Forschungsinstitute der Region im Bereich Wasserstofftechnologien sowie KI-Netzwerk zu nutzen, um moderne Technologien an das Textilrecycling anzubinden
- Den wichtigen Know-How-Transfer zu Unternehmen der Textilindustrie über die gesamte Wertschöpfungskette mit dem Schwerpunkt KMU darzustellen
- Die Ausbildung von Fachkräften über die beiden Hochschulinstitutionen Universität und Hochschule Augsburg sicherzustellen
- Ansiedlungsanreize für neue Industriebereiche der textilen Verwertung von Abfällen zu ermöglichen.

Eine regionale Ausweitung der Aktivitäten entlang der A8 zu den Aktivitäten in Baden-Württemberg könnte die Effizienz der Maßnahmen weiter steigern.

Die Einordnung der Technologien und Forschungspartner im geplanten Kompetenzzentrum werden in der nachfolgenden Abbildung 11-2 nochmals veranschaulicht.

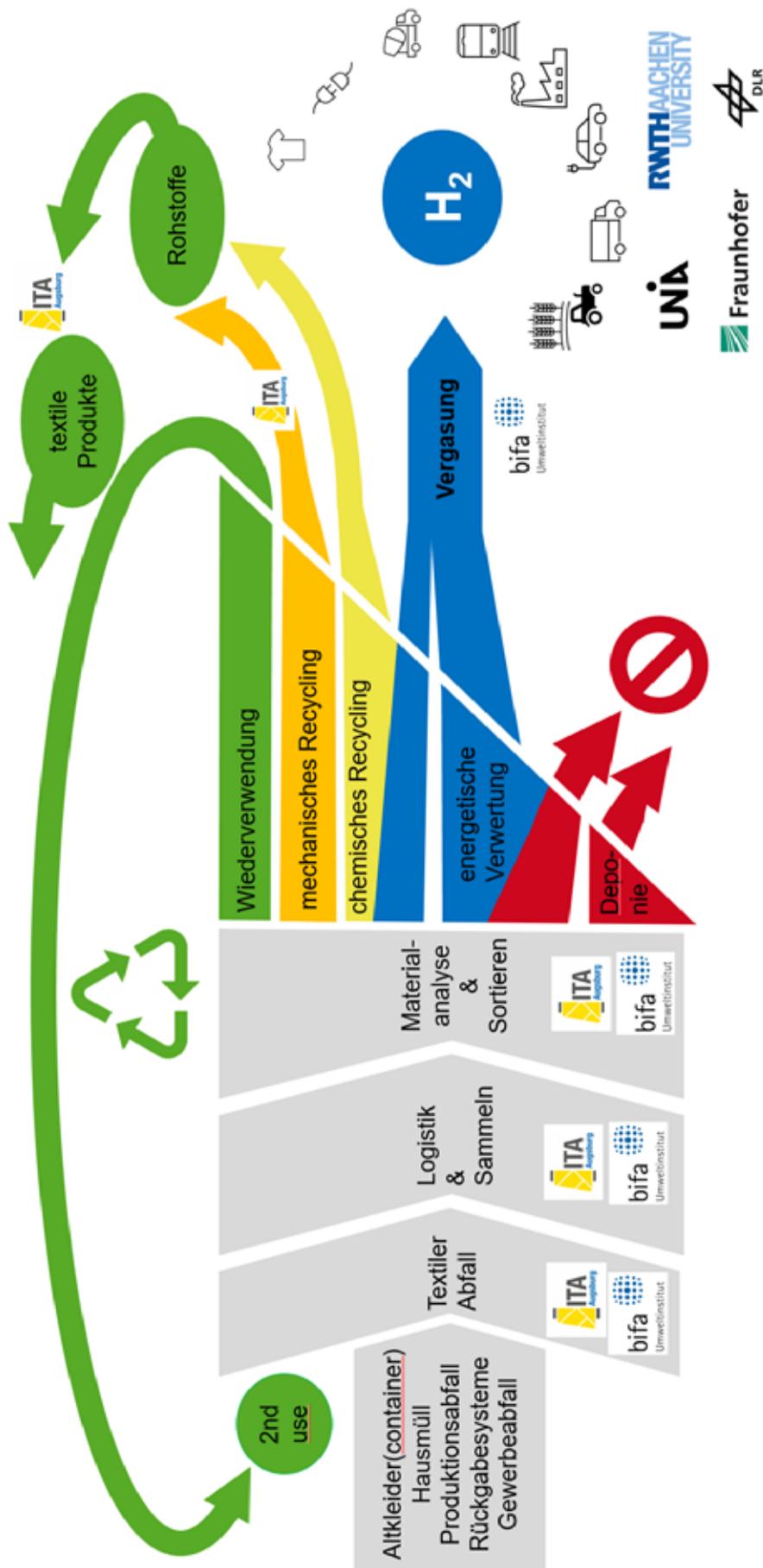


Abbildung 11-2: Recycling Hub

Die Abbildung macht deutlich, dass die sich ergänzenden Technologien der textilen Wiederverwendung und Wiederverwertung nicht zuletzt wegen der Verzahnung mit den vorbereiteten Technologien nur in enger Abstimmung und Ergänzung über die gesamte Prozesskette zu realisieren sind. Eine schrittweise Umsetzung und Kombination der verschiedenen Recyclingtechnologien muss Hand in Hand mit neuen Sammel- und Sortierstrategien als auch mit realisiertem Design-4-Recycling realisiert werden. Somit ergeben sich folgende aufeinander aufbauende Entwicklungsschritte, die in geeigneten Verbundprojekten im Kompetenzzentrum mit der Industrie weiterentwickelt werden können:

1. **Fokussierung auf das mechanische Recycling**, um das ökonomische Potenzial kombiniert mit der vorhandenen industriellen Skalierbarkeit und der Ausschöpfung verbesserter Qualität zeitnah umsetzen zu können.
2. Entwicklung verbesserter **Rücknahmesysteme** zur Qualitätssteigerung der Alttextil-Rohstoffe für die verschiedenen Recyclingsysteme
3. Fortsetzung und Intensivierung der **Entwicklung automatischer Sortiersysteme** mit Hilfe neuartiger Sensorik und Methoden der KI
4. **Intensivierung der Forschung zur Erzeugung von Wasserstoff durch Vergasung von Alttextilien** und Potenzialabschätzung einer industriellen Umsetzung
5. Integration sinnvoller Systeme zum **chemischen Recycling** als Ergänzung zu den vorhandenen Recyclingsystemen mit dem Fokus auf Mischungen und nicht mehr ver-spinnbare (weil zu kurze) Faserqualitäten

Die Maßnahmen sollten in enger Abstimmung mit der Industrie realisiert werden, für die in Bayern aufgrund der vorhandenen Infrastruktur günstige Randbedingungen für eine industrielle Umsetzung bereits bestehen und weiter ausgebaut werden können.

## 12 Literaturverzeichnis

- Abfallbilanz Bayern (2020): Hausmüll in Bayern - Bilanzen 2020. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). November 2021.
- Agora – Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Version 1.2, Juni 2021
- Air Liquide (2022): <https://www.engineering-airliquide.com/de/rectisol-synthesegas-reinigung> abgerufen am 26.07.2022
- Altex (2022): ALTEX Textilrecycling GmbH
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung (2023): Jahresbericht zur Abfallwirtschaft in der Steiermark 2021. Graz, 2023. Online verfügbar: [https://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/12900248\\_135033730/9603ac86/ABT14-433444\\_2022-6\\_Abfallbericht\\_Steiermark\\_2021\\_inkl.\\_angedienteAbf%C3%A4lle\\_final\\_2023.01.16\\_G\\_U.pdf](https://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/12900248_135033730/9603ac86/ABT14-433444_2022-6_Abfallbericht_Steiermark_2021_inkl._angedienteAbf%C3%A4lle_final_2023.01.16_G_U.pdf)
- ASUE (2021): Grau, Blau oder Grün: Was kostet der Wasserstoff? Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. im Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. - Technisch-wissenschaftlicher Verein. [https://asue.de/aktuelles\\_presse/kosten\\_von\\_wasserstoff\\_hydex](https://asue.de/aktuelles_presse/kosten_von_wasserstoff_hydex), abgerufen am 15.12.2021
- AWS (2015): Abfallwirtschafts- und Stadtreinigungsbetrieb der Stadt Augsburg: Abfall-ABC. <http://www.abfallratgeber.augsburg.de>. Stand: 01.04.2017
- AWS (2017): Konzept zur Erfassung von Alttextilien im Stadtgebiet Augsburg. Aws- Abfallwirtschafts- und Stadtreinigungsbetrieb der Stadt Augsburg. Abschlussbericht bifa Umweltinstitut vom 26.06.2021
- Barbarias, I.; Arregi, A.; Artetxe, M.; Santamaria, L.; Lopez, G.; Cortazar, M.; Amutio, M.; Bilbao, J.; Olazar, M. (2018) Waste Plastics Valorization by Fast Pyrolysis and in Line Catalytic Steam Reforming for Hydrogen Production, Recent Advances in Pyrolysis
- Baumwollpreise (2022); <https://www.wallstreet-online.de/rohstoffe/baumwollpreis>; Zugriff: November 2022
- BayLfU (2001): Sammlung und Verwertung von Alteppichen. LfU-3/1-4272. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.). Mai 2021, Augsburg. Online verfügbar: [https://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/abfallverwertung/doc/sam\\_verw\\_altepp.pdf](https://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/abfallverwertung/doc/sam_verw_altepp.pdf)
- BayLfU (2003): Zusammensetzung und Schadstoffgehalte von Siedlungsabfällen. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.), Augsburg
- BayLfU (2014): Nutzung des CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzials des Restmülls von Haushalten durch verbesserte Sekundärrohstoffabschöpfung. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg
- BayLfU (2015): Restmüll und getrennt erfasste Wertstoffe aus Haushalten in Gebietskörperschaften mit Ident-System. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg
- BayLfU (2017): InfoBlätter Kreislaufwirtschaft: Gebrauchte Kleidung und Textilien. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). Stand 4/2017
- BayLfU (2020): Hausmüll in Bayern. Bilanzen 2020. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). November 2021.

- bifa (2021): Sortieranalysen von Restabfall und Bioabfall. ZAK-Kempten, Zweckverband für Abfallwirtschaft Kempten (ZAK); Abschlussbericht bifa Umweltinstitut vom 27.07.2021
- bifa (2022): Potenziale einer Wasserstoffgewinnung durch Vergasung von Gewerbeabfall; bifa-Text Nr. 72
- Biver, M.; Turner, A.; Filella, M. (2021): Antimony release from polyester textiles by artificial sweat solutions: A call for a standardized procedure, *Regulatory Toxicology and Pharmacology* Vol. 119, February 2021
- Blazsó, M. (2010). "5 - Pyrolysis for recycling waste composites." In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Management, Recycling and Reuse of Waste Composites, edited by Vanessa Goodship, 102-121.
- BMWi (2020): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – Die Nationale Wasserstoffstrategie
- BMWK (2022); Branchenfokus Textil 2022. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-textil.html>; Zugriff 06.07.2022
- BNEF (2020): BlumbergNEF. Hydrogen Economy Outlook.
- Bonnorange (2022): <https://www.bonnorange.de/nachhaltigkeit/klimarechner/abfallhierarchie>
- Bukhari Mohammad Abdullatif, Ruth Carrasco-Gallego and Eva Ponce-Cueto (2018), Developing a national programme for textiles and clothing recovery. *Waste Management & Research* 2018, Vol. 36(4) 321 –331
- Bukold, S. (2020): Kurzstudie blauer Wasserstoff – Perspektiven und Grenzen eines neuen Technologiepfads. Greenpeace Energy (Hrsg.) Online verfügbar: <https://green-planet-energy.de/fileadmin/docs/publikationen/Studien/blauer-wasserstoff-studie-2020.pdf>
- BVSE (2015); Julia Korolkow; Bedarf, Konsum und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland, BVSE - Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. 2015
- BVSE (2020); B.A. Sebastian Forbrig, Dipl.-Ing. Thomas Fischer, Ass. Jur. Beate Heinz Bedarf, Konsum und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland, BVSE Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. 2021
- Carbios 2022; <https://www.carbios.com/en/enzymatic-recycling/>; Zugriff Dezember 2022
- Chemietechnik (2022): <https://www.chemietechnik.de/energie-utilities/wasserstoff/was-kostet-wasserstoff-jetzt-und-in-zukunft-338.html> abgerufen am 29.08.2022
- Cieslak et al. (2006); Malgorzata Cieslak, Hubert Schmidt, EWA Gromadzinska, Stanislaw Wrobel, *Studies on the Management of textile floor covering waste*, 2006
- Ciuta, S; Tsiamis, D; Castaldi, M. (2018): *Gasification of Waste Materials, Technologies for Generating Energy, Gas and Chemicals from Municipal Solid Waste, Biomass, Nonrecycled Plastics, Sludges and Wet Solid Wastes* S. 65–91. Elsevier, Amsterdam
- CN104479758A (2014): Gasification method of waste textile fabrics
- CycleTex (2022); Studie CycleTex BW, Kreislaufwirtschaft von Pre-Consumer-Textilabfällen Abfallströme und deren Entsorgung in der textilen Produktion AFBW – Allianz Faserbasierte Werkstoffe Baden-Württemberg e.V. 2022
- Czernik, S. und French, R. (2006): Production of Hydrogen form Plastics by Pyrolysis and Catalytic Steam Reform, *Energy and Fuels* 2006, 20, S. 754-758

- Damayanti (2021): Damayanti, Damayanti, Latasya Adelia Wulandari, Adhanto Bagaskoro, Aditya Rianjanu, Ho-Shing Wu; Possibility Routes for Textile Recycling Technology. *Polymers* 2021, 13, 3834-3865. <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/21/3834>
- Datenpool bifa (2022): Daten aus bifa-Sortieranaylisen seit dem Jahr 2000 bis zum Jahr 2022. bifa Umweltinstitut GmbH, Augsburg
- DBFZ (2013): Zech, K. et al.: Hy-NOW. Evaluierung der Verfahren und Technologien für die Bereitstellung von Wasserstoff auf Basis von Biomasse. Endbericht Deutsches Biomasseforschungszentrum
- DBU (2017); Untersuchung zur optimierten stofflichen Verwertung von Sperrmüll - insbesondere Matratzen, Teppiche/Teppichböden und Kunststoffe - aus Haushaltungen unter der Berücksichtigung der gemeinsamen Behandlung mit gewerblichen Sperrmüllanteil, Osnabrücker Abfallwirtschaft mbH März 2017
- Debicki Lukasz, ITA Aachen, Textil zu Textilrecycling in der Outdoorbranche, *Textile.4U*, Ausgabe 2, 2021
- Deutsche Umwelthilfe 2017; Unter den Teppich gekehrt- Das große Entsorgungsproblem der Teppichbodenindustrie in Deutschland, Deutsche Umwelthilfe e.V. Februar 2017
- DIHK (2020): Deutsche Industrie- und Handelskammer. Faktenpapier-Wasserstoff.
- DIN. (1969). DIN 60000 Textilien; Grundbegriffe. Berlin: Deutsches Institut für Normung eV. (DIN 60000:1969)
- DiTex (2022); <https://www.ditex-kreislaufwirtschaft.de/>; Zugriff: Oktober 2022
- Ducharme, C. (2010): Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes, Master thesis, Columbia University
- Ebara (2020): <https://www.eep.ebara.com/en/news/newsrelease/20201006.html> - EBARA Environmental Plant and Ube Industries Sign Agreement with JGC Corporation to License EUP abgerufen am 08.02.2022
- Ebara (2021): Persönliche Korrespondenz
- Ebara (2022): [https://www.eep.ebara.com/en/business\\_technology/technology\\_3.html](https://www.eep.ebara.com/en/business_technology/technology_3.html) abgerufen am 07.06.2022
- ECRA (2021); leading the carpet industry towards circular economy - A2030 strategic approach, European carpet and rug association (ECRA) 2021
- Ellen MacArthur Foundation (2017), A new textiles economy: Redesigning fashion's future. <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>
- EMPA (2020); <https://subitex.empa.ch/>; Zugriff: 26.06.2022
- Enerkem (2022): <https://enerkem.com/process-technology/carbon-recycling/> abgerufen am 07.06.2022
- EU\_GreenDeal; A European Green Deal-Striving to be the first climate-neutral continent, [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en); Zugriff: November 2022
- Euratex (2022); <https://euratex.eu/news/euratex-2022-spring-report-putting-the-eu-textiles-strategy-in-a-global-context/>; Zugriff: September 2022

- Europäische Kommission (2021): Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling. Online verfügbar: <https://op.europa.eu/o/opportal-service/download-handler?identifier=739a1cca-6145-11ec-9c6c-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part=>
- Forschungszentrum Jülich (2020): Wege für die Energiewende - Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050 (Szenario 95)
- EU (2022); MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTSUND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN EU Strategie für nachhaltige und kreislauffähige Textilien; COM (2022) 141 final; Brüssel 2022
- EU Strat (2022); European Commission EU Strategy for sustainable and circular textiles COM (2022) 141 final
- EUSyn (2022); PlanMiljo, Synopsis report on the consultation on the EU strategy for sustainable and circular textiles 2022
- EUWID (2021): Geplante „Waste2chemicals“-Anlage im Hafen Rotterdam soll Flugbenzin produzieren,
- EUWID Recycling und Entsorgung 24. 2021 S.23
- Fashion for good (2022); Hilde van Duijn, Natalia Papú Carrone, Ola Bakowska, Qianjing Huang, Draads Marieke Akerboom, Kathleen Rademan, Dolly Vellank; Sorting for circularity - Europe- an evaluation and commercial assesment of textile waste across europe, Fashion for good September 2022
- Gaya (2014): [www.projetgaya.com/en](http://www.projetgaya.com/en), abgerufen am 22.01.2021
- Global Fashion Agenda (2017), Pulse of the fashion industry, Global Fashion Agenda 2017; <https://globalfashionagenda.org/>; Zugriff: Juli 2022
- GTI (2015): Green Gasoline from Wood using Carbona Gasification and Topsoe TIGAS Process, Final Report (No. DE-EE0002874)
- Güssing (2021): Biomassekraftwerk Güssing, [www.guessing.co.at/index.php/biomassekraftwerk-guessing](http://www.guessing.co.at/index.php/biomassekraftwerk-guessing), abgerufen am 21.01.2021
- Higg (2019) MSI; JESRT: 8(7), July 2019;
- HNLUG (2020), Turuc Adrian, Textilrecycling - Probleme und Lösungsansätze, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie 2020
- IEA Bioenergy (2019): IEA Bioenergy Task 33 special report- Status Report on thermal gasification of biomass and waste 2019
- IndBer (2022); Industriebericht Bayern, [https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user\\_upload/stmwi/publikationen/pdf/2022\\_09\\_01\\_Industriebericht\\_Bayern\\_2022\\_BF.pdf](https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/publikationen/pdf/2022_09_01_Industriebericht_Bayern_2022_BF.pdf); Zugriff: Oktober 2022
- Inentec (2022): <https://inentec.com/pem-technology/pem-process-details/> abgerufen am 07.06.2022
- INTERREG (2019); [https://www.imat-uve.de/hubfs/PDF%20Presse\\_News\\_Events/Interreg\\_imat-uve\\_DE.pdf](https://www.imat-uve.de/hubfs/PDF%20Presse_News_Events/Interreg_imat-uve_DE.pdf); Zugriff 06.07.2022

- Iribarren, D., et al. (2014); Environmental and exergetic evaluation of hydrogen production via lignocellulosic biomass gasification, *Journal of Cleaner Production* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.068>
- ITA (2022); Datenpool ITA Augsburg gGmbH, Diverse Förderprojekte: CarboYarn19, CaRinA20, Cosimo22, EasyVlies20, IZI20, NICIta22, ÖkoCab22, RecyTape17, ReFab22, Recyclingatelier
- ITAA (2022); Amrei Becker, Ricarda Wissel, Thomas Gries, Stand der Entwicklung technischer Lösungen für das Textilrecycling, ITA 2022
- Iwd- Informationsdienst des Instituts der deutschen Wirtschaft (2019): <https://www.iwd.de/artikel/energie-aus-wasserstoff-eine-chance-fuer-das-klima-446387/> abgerufen am 31.05.2022
- Janz (2020): Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen – eine Alternative zur werkstofflichen Verwertung? in: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Quicker, P.; Gosten, A. (Hrsg.), *Energie aus Abfall*, Band 17, S. 67–70, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin 2020.
- JRC (2021); Circular economy perspectives in the EU Textile sector. Technical Report. Online verfügbar: [https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC125110/jrc125110\\_ce\\_perspectives\\_for\\_eu\\_textiles\\_tr\\_10.06.2021\\_final.pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC125110/jrc125110_ce_perspectives_for_eu_textiles_tr_10.06.2021_final.pdf)
- Jülich (2020); Robinius, M.; Marketwitz, P.; Lopion, P.; Kullmann, F.: *WEGE FÜR DIE ENERGIEWENDE Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050*
- Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H. (2009): *Energie aus Biomasse*, Springer Verlag, Heidelberg, korrigierter Nachdruck 2009
- Karl B. Murr; <https://www.historisches-lexikon-bayerns.de/Lexikon/Textilindustrie>; Zugriff: Oktober 2022
- Klimaandmore (2020): <https://klimaandmore.de/?p=3169> abgerufen am 10.08.2022
- Kraussler Michael (2018): Evaluation of dual fluidized bed biomass gasification plants generating electricity, valuable gases and district heat; <https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/3498/2/Kraussler%20Michael%20-%202018%20-%20Evaluation%20of%20dual%20fluidized%20bed%20biomass%20gasification...pdf>. Zugriff: 18.05.2021
- Lanzatech (2021): [www.lanzatech.com/2021/01/07/building-europes-first-of-its-kind-alcohol-to-jet-production-plant](http://www.lanzatech.com/2021/01/07/building-europes-first-of-its-kind-alcohol-to-jet-production-plant), abgerufen am 05.02.2021
- Lechleitner, A.; Schwabl, D.; Schubert, T.; Bauer, M.; Lehner, ;M. (2019): Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote
- LK Augsburg (2012): Hausmüllanalyse im Landkreis Augsburg. Frühjahr 2012. Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises Augsburg. Zeller GmbH. Juni 2012.
- LK Leipzig (2011): Restanalyse 2011. Gesamtergebnis. Landkreis Leipzig. SHC Sabrowski-Hertrich-Consult GmbH. Erlenbach am Main, 16. August 2011.
- LK Mühldorf am Inn (2006): Untersuchung des Restabfalls aus Haushalten im Landkreis Mühldorf am Inn. Fabion GbR. Januar 2006.

- Loipersböck J.; Luisser, M.; Müller, S; Hofbauer, H.; Rauch, R. (2018): Experimental Demonstration and Validation of Hydrogen Production Based on Gasification of Lignocellulosic Feedstock; *ChemEngineering* 2018, 2, 61
- Lopez, G.; Artetxe, M.; Amutio, M.; Alvarez, J.; Bilbao, J.; Olazar, M. (2018): Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82 Part 1, Feb. 2018, S. 576-596
- Lui, K.; Cui, Z.; Fletcher, T. (2010): Chapter 4 Coal Gasification, Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies
- Ma, Y.; Liao, Y.; Su, Y.; Wang, B.; Yang, Y.; Ji, D.; Li, H.; Zhou, H.; Wang, D. (2021) Comparative Investigation of Different CO<sub>2</sub> Capture Technologies for Coal to Ethylene Glycol Process. *Processes*, 2021, 9, 207. <https://doi.org/10.3390/pr9020207>
- MaGo (2016); Martens/Goldmann: Recyclingtechnik, Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Aufl., Wiesbaden: Springer Verlag, 2016
- Mahishi, M.; Goswami, D. Y. (2007) Thermodynamic optimization of biomass gasifier for hydrogen production; *International Journal of Hydrogen Energy* 32; S. 3831-3840
- Margasa (2022): <https://www.margasa.com/products/textile-recycling/bl-2500-beater-cleaner/> abgerufen am 03.06.2022
- Maryan, A.S.; Montazer, M.; Damerchely, R. (2015), Discoloration of denim garment with color free effluent using montmorillonite based nano clay and enzymes: Nano biotreatment on denim garment. *J. Clean. Prod.* 2015
- Mauerhofer A. M.; Schmid, J.C.; Benedikt, F.; Fuchs, J.; Müller, S.; Hofbauer, H. (2019): Dual fluidized bed steam gasification: Change of product gas quality along the reactor height, *Energy* Vol. 173 p. 1256–1272
- Mc Kinsey, *Fashion on Climate*; <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/retail/our%20insights/fashion%20on%20climate/fashion-on-climate-full-report.pdf>, Zugriff 03.06.2022
- Meinbezirk.at (2016): Güssinger Kraftwerksplanungsfirma Repotec insolvent, [www.meinbezirk.at/guessing/c-wirtschaft/guessinger-kraftwerksplanungsfirma-repotec-insolvent\\_a1862588](http://www.meinbezirk.at/guessing/c-wirtschaft/guessinger-kraftwerksplanungsfirma-repotec-insolvent_a1862588), abgerufen am 22.01.2021
- Meyer, S., Hertel, M. (2015): Begleitung Pilotversuch zur Erfassung von Alttextilien im Auftrag einer Abfallwirtschaftsgesellschaft in Baden-Württemberg. bifa-Abschlussbericht vom 15.09.2015
- Miandad, R.; Rehan, M.; Barakat, M.; Aburiazaiza, A.; Khan, H.; Ismail, I.; Dhavamani, J.; Gardy, J.; Hassanpour, A.; Nizami, A. (2019). "Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste: Moving Toward Pyrolysis Based Biorefineries." *Frontiers in Energy Research* 7: 27
- Mistra Future Fashion (2019); Recycling and industry experts; McKinsey analysis
- Mosinska, M.; Szyrkowska, M.; Mierczynski, P. (2020) Oxy-Steam Reforming of Natural Gas on Ni-Catalysts, *Catalysts* 2020, 10(8), 896
- Niu, Miaomiao; Huang, Yaji; Jin, Baoshang; Wang, Xinye (2014); Oxygen Gasification of Municipal Solid Waste in a Fixed-bed Gasifier; *Chinese Journal of Chemical Engineering* Vol 22, Issue 9 S.1021-1026
- Nunes, R.; Godina, R.; Matias, J.; Catalao, J. (2018): Economic and environmental benefits of using textile waste for the production of thermal energy; *Journal of Cleaner Production*, Vol. 171, Jan. 2018, S. 1353-1360

- Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (2022): <https://www.energy.gov/eere/fuel-cells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>; Zugriff: 31.05.2022
- Otto (2021); Gebrüder Otto Dietenheim GmbH&Co.KG; <https://www.presseportal.de/pm/146641/4962373>; Zugriff 27.06.2022
- Parvez, A.; Hafner, S.; Hornberger, M.; Schmid, M.; Scheffknecht, G.: (2021) Sorption enhanced gasification (SEG) of biomass for tailored syngas production with insitu CO<sub>2</sub> capture: Current status, process scale-up experiences and outlook; Renewable and Sustainable Energy Reviews; Vol. 141, Mai 2021
- Perkins, G. (2020): Production of electricity and chemicals using gasification of municipal solid wastes. In: Waste Biorefinery, Bhaskar, T. et al.(eds.), 2020, pp. 3-39
- Piribauer, B.; Bartl, A. (2019) Textile recycling processes, state of the art and current developments: A mini review. Waste Manag. Res. 2019
- Plagazi (2021): [www.plagazi.com/plagazi-ab-receives-german-order-worth-50-million-euros](http://www.plagazi.com/plagazi-ab-receives-german-order-worth-50-million-euros), abgerufen am 05.02.2021
- PlasTi (2022), <https://plasticker.de/preise/pms.php?show=ok&make=ok&aog=A&kat=Regrenulat>; Zugriff: November 2022
- Platon, A.; Wang, Y. (2009): Water-Gas Shift Technologies in Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies S. 311–356
- Pohjakallio, M.; Vuorinen, T.; Oasmaa, A. (2020) “Chapter 13 - Chemical routes for recycling—dissolving, catalytic, and thermochemical technologies.” In Plastic Waste and Recycling, edited by revor M. Letcher, 359-384.
- PRI\_SDG; Initiative Principles of Responsible Investments. <https://www.euramco-asset.de/glossar/environmental-social-governance-esg/>; Zugriff: November 2022
- Probas, 2022; Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme; [https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B9C8CC0C0-9333-46CA-9BD2-02BE919555F6%7D#:~:text=Energiebedarf%3A%20Die%20Proze%3%9Fenergie%20zur%20Herstellung,%20zusammen%20\(Tellus%201992\)](https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B9C8CC0C0-9333-46CA-9BD2-02BE919555F6%7D#:~:text=Energiebedarf%3A%20Die%20Proze%3%9Fenergie%20zur%20Herstellung,%20zusammen%20(Tellus%201992););Zugriff: August 2022
- Quicker, P. (2019): Evaluation of Recent Developments Regarding Alternative Thermal Waste Treatment with a Focus on Depolymerisation Processes
- Re4Tex (2022); <https://www.re4tex-netzwerk.de/>; Zugriff 19.05.2022
- Rheingau-Taunus-Kreis (2012): Hausmüllanalyse 2021. Rheingau-Taunus-Kreis. SHC Sabrowski-Hertrih-Consult GmbH. 2012
- RITTEC, 2022; Carsten Eichert, Empowering circularity revolPET® - Closed Loop Recycling für Polyestertextilien; Vortrag Abschlussveranstaltung Ditex Berlin, 20. Oktober 2022
- Rittfors J. (2020): Thermochemical textile recycling – Investigation of pyrolysis and gasification of cotton and polyester, Master thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg
- RohKla, 2022; Stephan Baz, Johannes Leis, Rohstoffklassifizierung\_Präsentation\_STFI\_DITF\_Vortrag zum 15. Kolloquium „re4tex“ am 18. Mai 2022, Chemnitz
- Rohn G., Die Spinnerei in technologischer Darstellung, Springer Verlag 1910
- Rotter Julian B. Ph. D. & Dorothy J. Hochreich (1979); Maslows Ganzheitstheorie, 1979 Springer-Verlag Berlin, Heidelberg

- Schädel, B (2008): Wasserdampfreformierung von Erdgas mit Rhodiumkatalysatoren: Aktivität und Deaktivierung, Dissertation Universität Karlsruhe
- SCIRT (2021); <https://tiss.tuwien.ac.at/fpl/project/index.xhtml?id=1838975>; Zugriff 28.06.2022
- SERDP, Strategic Environmental Research and Development Program (2021). [www.serdp-estcp.org/Program-Areas/Installation-Energy-and-Water/Energy/Distributed-Generation/EW-201334](http://www.serdp-estcp.org/Program-Areas/Installation-Energy-and-Water/Energy/Distributed-Generation/EW-201334), abgerufen am 22.02.2021
- Shahabuddin, M.; Krishna, B.; Bhaskar, T.; Perkins, G. (2019): Advances in the thermochemical production of hydrogen from biomass and residual wastes: Summary of recent techno-economic analyses
- Sierra Energy (2021a): <https://sierraenergy.com>, abgerufen am 08.01.2021
- Sierra Energy (2021b): Persönliche Korrespondenz
- Sierra Energy (2022): <https://sierraenergy.com/complete-fastox-system-plant/> abgerufen am 07.06.2022
- Sircar, S.: Golden, T.C. (2009): Pressure Swing Adsorption Technology for Hydrogen Production, in Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies, 414450
- SOEX (2022); Carsten Steckert; Sortierung textile Abfälle; Vortrag zum 15. Kolloquium „re4tex“ am 17./18.05.22 Chemnitz
- Wasserburg (2012): Durchführung einer Hausmüllanalyse in der Stadt Wasserburg am Inn. Endbericht. Fabion GbR. Fassung 19.10.2012.
- Statista Anteil Faserarten; Statistiken zu Textilien; <https://de.statista.com>  
Diagramm: Verteilung der Faserproduktion weltweit nach Faserart; Zugriff: August 2022
- Statista Erntemengen; Statistiken zu Textilien <https://de.statista.com>  
Diagramm: Erntemenge von Baumwolle weltweit in den Jahren 1995/96 bis 2022/23; Zugriff: November 2022
- Statista Produktionsmengen; Statistiken zu Textilien <https://de.statista.com>  
Diagramm: Weltweite Produktionsmenge von Textilfasern seit 1975; Zugriff: August 2022
- Statista Umsatz; Statistiken zu Textilien <https://de.statista.com>  
Diagramm: Umsatz der deutschen Textil- und Bekleidungsindustrie in den Jahren 2008 bis 2021; Zugriff August 2022
- Statista Textil; Statistiken zu Textilien <https://de.statista.com>  
Diagramm: Anzahl der Beschäftigten in der deutschen Textil- und Bekleidungsindustrie in den Jahren 2008 bis 2021; Zugriff August 2022
- Statistik Bayern (2022): <https://www.statistik.bayern.de/presse/mitteilungen/2022/093/index.html> abgerufen am 13.12.2022
- StMWi (2020): Bayerische Wasserstoffstrategie
- Strukturatlas (2021): Strukturatlas der Stadt Augsburg 2021. Herausgegeben von Stadt Augsburg. Referat Oberbürgermeisterin. Amt für Statistik und Stadtforschung. ISSN 1867-1020.
- Südwest-Presse (2019): Holzgas-Heizkraftwerk wird wohl stillgelegt, Senden: Holzgas-Heizkraftwerk wird wohl stillgelegt | Südwest-Presse Online (swp.de), abgerufen am 22.01.2021

- SWiTex (2021); Caroline Roithner, Anna Simone Weber, Helmut Rechberger, Andreas Bartl, Wolfgang Ipsmiller; Beschreibung des Stands des Wissens zu Textilrecyclingtechnologien, Technische Universität Wien Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement, November 2021
- TBU (2019): Restmüllanalysen im Land Steiermark 2018/2019. Technisches Büro für Umweltschutz Ges.m.b.H, Innsbruck. Online verfügbar: [https://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10168259\\_4336659/9ebb79bd/Restm%C3%BCllanalysen%20Steiermark%202018\\_19%20Endbericht.pdf](https://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10168259_4336659/9ebb79bd/Restm%C3%BCllanalysen%20Steiermark%202018_19%20Endbericht.pdf)
- TechTex, (2022); Statistiken zu technischen Textilien; <https://de.statista.com/themen/7096/technische-textilien/>; Zugriff: 23.03.2022
- Tex Cycle (2022); [https://www.innovation-strukturwandel.de/strukturwandel/shareddocs/entries/de/InnovationsforumMittelstand/Initiativen/innovationsforen-mittelstand/textcycle\\_700.html?nn=450866](https://www.innovation-strukturwandel.de/strukturwandel/shareddocs/entries/de/InnovationsforumMittelstand/Initiativen/innovationsforen-mittelstand/textcycle_700.html?nn=450866); Zugriff: Juli 2022
- Textilbündnis; <https://www.textilbuendnis.com/ocmr2022/>; Zugriff Oktober 2022
- Textile Exchange (2022), [https://textileexchange.org/app/uploads/2022/10/Textile-Exchange\\_PFMR\\_2022.pdf](https://textileexchange.org/app/uploads/2022/10/Textile-Exchange_PFMR_2022.pdf); Zugriff: August 2022
- Thunmann, H.; Gustavsson, C.; Larsson, A.; Gunnarson, I.; Tengberg, F. (2019): Economic assessment of advanced biofuel production via gasification using cost data from the GoBiGas plant; Nergy Science and Engineering, Vol 7, Issue 1, Februar 2019; S. 217-229
- Trash2Cash (2019); <https://www.trash2cashproject.eu/>; Zugriff: 28.06.2022
- UBA (2020): Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien. UBA Texte 113/2020. Juni 2020.
- UBA (2022); Jörg Wagner, Sonja Steinmetzer, Laura Theophil, Anna-Sophie Strues, Nicole Kösegi, Dr. Stefan Hoyer; Evaluation der Erfassung und Verwertung ausgewählter Abfallströme zur Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft, Umweltbundesamt 31/2022
- UmBu (2020); Dr. Julia Vogel Dr. Franziska Krüger Matthias Fabian, Hintergrund //Juli 2020 Chemisches Recycling, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau; 2020
- UN-SDG; 21.10.2015; UN Nation 70/1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, <https://sdgs.un.org/publications/transforming-our-world2030-agenda-sustainable-development-17981>; Zugriff: Oktober 2022
- US8080693B2 (2009): Production of ethanol from methanol
- Valmet (2021): [www.valmet.com/energyproduction/gasification](http://www.valmet.com/energyproduction/gasification), abgerufen am 11.02.2021
- Vela, I.; Maric, J.; Seemann, M. (2019) Valorisation of textile waste via steam gasification in a fluidized bed reactor
- Velener, 2022; Velener Textil GmbH; <https://wecycled.de/>, Zugriff 27.06.2022
- Waste Management World (2021): <https://waste-management-world.com/waste-to-energy/waste-to-energy-lessons-from-japan/> abgerufen am 10.08.2022
- wear2wear (2019); <https://www.wear2wear.org/de/>; Zugriff 27.06.2022

- Wencker, T. (2021): Das Wie, Woher und Wohin von Wasserstoff. AKE Berlin, 7. September 2021, [https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/wasserstoff/2021/vor-traege/ASUE\\_Wencker\\_2021\\_Das%20Wie%2C%20Woher%20und%20Wo-hin%20von%20Wasserstoff.pdf](https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/wasserstoff/2021/vor-traege/ASUE_Wencker_2021_Das%20Wie%2C%20Woher%20und%20Wo-hin%20von%20Wasserstoff.pdf), abgerufen am 15.02.2022
- Wietschel, M.; Zheng, L.; Arens, M.; Hebling, C.; Ranzmeyer, O.; Schaadt, A.; Hank, C.; Sternberg, A.; Herkel, S.; Kost, C.; Ragwitz, M.; Herrmann, U.; Pfluger, B. (2021): Me-tastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Karlsruhe, Freiburg, Cottbus: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEG (Hrsg.)
- Wrap (2012); <https://wrap.org.uk/resources/report/valuing-our-clothes-cost-uk-fashion>  
Zugriff: September 2022
- Wu, Ye; Wen, Cheng, Chen Xiaoping; Jiang, Guodong; Liu, Guanna; Liu, Dong (2017): Cata-lytic pyrolysis and gasification of waste textile under carbon dioxide atmosphere with composite Zn-Fe catalyst; Fuel Processing Technology 166; S. 115-223

## 13 Danksagung

Die vorliegende Studie wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, dem Verband der Bayerischen Textil- und Bekleidungsindustrie e.V. und der Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V. gefördert. Für die Zurverfügungstellung der finanziellen Mittel sei an dieser Stelle ausdrücklich gedankt, gestattet diese Unterstützung doch einen wertvollen Beitrag zur Abklärung neuer Möglichkeiten der textilen Verwertung von Alttextilien.

Außerdem wurde die Studie im Bereich der Sortieranalyse durch die Firma TexAid und durch das Bistum Augsburg unterstützt sowie durch Informationsweitergabe durch die Firma Wittmann Recycling, wofür an dieser Stelle ebenso Dank ausgesprochen werden sollte.



**bifa Umweltinstitut GmbH**  
Am Mittleren Moos 46  
86167 Augsburg

Tel. +49 821 7000-0  
Fax. +49 821 7000-100  
E-Mail: [marketing@bifa.de](mailto:marketing@bifa.de)  
[www.bifa.de](http://www.bifa.de)