

Fachgebiet Sustainable Engineering (FG SEE) der TU Berlin

**Ökobilanzielle Bewertung des Lebensweges eines handelsüblichen weißen
Baumwolle T-Shirts in Deutschland**

Ökobilanz nach ISO 14040/14044

Version: 5. Entwurf (12/02/2019)

Auftraggeber: Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e. V. (IKW)

Autoren: Dr. Annekatriin Lehmann, Martin Roffeis, Prof. Dr. Matthias Finkbeiner

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	ii
Tabellenverzeichnis	iv
Abkürzungsverzeichnis	vii
1. Einleitung.....	1
2. Festlegung des Ziel und Untersuchungsrahmens	2
2.1. Ziel der Studie.....	2
2.2. Gründe der Durchführung.....	2
2.3. Anwendung der Studie	4
2.4. Zielgruppen	4
3. Untersuchungsrahmen der Studie.....	5
3.1. Funktionelle Einheit	5
3.2. Untersuchtetes Produktsystem	5
3.3. Grenzen des Produktsystems	6
3.4. Abschneidekriterien	9
3.5. Allokationsmethode.....	9
3.6. Datenerhebung und Anforderung an die Datenqualität.....	9
3.7. Methode der Wirkungsabschätzung.....	12
3.8. Art und Methode der Auswertung.....	12
3.9. Kritische Prüfung.....	13
3.10. Art des Berichts.....	13
4. Sachbilanz.....	14
4.1. Datengrundlage	14
4.2. Modellierung.....	14
5. Wirkungsabschätzung.....	35
5.1. Beitragsanalyse.....	35
5.2. Szenarioanalyse.....	38
6. Auswertung.....	47
6.1. Identifikation der signifikanten Parameter	47
6.2. Sensitivitätsprüfung	47
6.3. Vollständigkeits- und Konsistenzprüfung.....	57
6.4. Schlussfolgerungen und Zusammenfassung.....	57
7. Referenzen.....	59
8. Anhang	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1. Lebensweg eines weißen Baumwolle T-Shirts (schematisch).....	3
Abbildung 3-1. Grenzen des Produktsystems und Verknüpfung der Prozessmodule	7
Abbildung 3-2. Hintergrund- und Vordergrundsystem der betrachteten Prozesskette.	8
Abbildung 4-1. Modellhafte Betrachtung des Lebensweges eines handelsüblichen weißen Baumwolle T-Shirts.....	15
Abbildung 4-2. Herstellung von Flüssigwaschmittel – Modellierung in GaBi 8.7.....	26
Abbildung 4-3. Teilprozess Wäschepflege (Waschen) – Modellierung in GaBi 8.7.....	30
Abbildung 4-4. End-of-Life der verwendeten Verpackungsmaterialien – Modellierung in GaBi 8.7.....	32
Abbildung 5-1. Umweltwirkungen der unterschiedenen Lebenswegphasen im zum Gesamtergebnis in den untersuchten Wirkungskategorien.	36
Abbildung 5-2. Relative Beiträge des Waschens und Trocknens zu den Umweltwirkungen im Modul D (Nutzung und Pflege des T-Shirts).	37
Abbildung 5-3. Zusammensetzung der Umweltwirkungen im Teilprozess Waschen (Nutzung und Pflege des T-Shirts).....	38
Abbildung 5-4. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP).....	39
Abbildung 5-5. Versauerungspotenzial (AP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP).....	40
Abbildung 5-6. Eutrophierung, terrestrisch (EP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP).....	41
Abbildung 5-7. Ökotoxpotenzial, aquat. Frischwasser (FAETP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP).....	42
Abbildung 5-8. Treibhauspotenzial (GWP 100) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP).....	43
Abbildung 5-9. Ökotoxpotenzial, aquat. Salzwasser (MAETP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP).....	44
Abbildung 5-10. Landnutzung (LU) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP).....	45
Abbildung 5-11. Ressourcenverbrauch Wasser (WDP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP).....	46
Abbildung 6-1. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei verändertem Einsatz der maschinellen Trocknung (MT: 0 bis 100 %).....	48

Abbildung 6-2. Treibhauspotenzial (GWP 100) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei verändertem Einsatz der maschinellen Trocknung (MT: 0 bis 100 %).	49
Abbildung 6-3. Ressourcenverbrauch Wasser (WDP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei verändertem Einsatz der maschinellen Trocknung (MT: 0 bis 100 %).	49
Abbildung 6-4. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmitteldosierung (WMD: 35 bis 200 ml).	50
Abbildung 6-5. Versauerungspotenzial (AP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmitteldosierung (WMD: 35 bis 200 ml).	51
Abbildung 6-6. Treibhauspotenzial (GWP 100) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmitteldosierung (WMD: 35 bis 200 ml).	51
Abbildung 6-7. Eutrophierung, terrestrisch (EP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmitteldosierung (WMD: 35 bis 200 ml).	52
Abbildung 6-8. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmaschinenbeladung (MB: 3.5 bis 7.3 kg).	53
Abbildung 6-9. Treibhauspotenzial (GWP 100) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmaschinenbeladung (MB: 3.5 bis 7.3 kg).	53
Abbildung 6-10. Ressourcenverbrauch Wasser (WDP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmaschinenbeladung (MB: 3.5 bis 7.3 kg).	54
Abbildung 6-11. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Washhäufigkeit (WHF: 1- bis 80-maliges Waschen).	55
Abbildung 6-12. Treibhauspotenzial (GWP 100) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Washhäufigkeit (WHF: 1- bis 80-maliges Waschen).	55
Abbildung 6-13. Ressourcenverbrauch Wasser (WDP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Washhäufigkeit (WHF: 1- bis 80-maliges Waschen).	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1. Textileigenschaften des untersuchten Baumwolle T-Shirts.....	5
Tabelle 3-2. Anforderungen an die Datenqualität entsprechend ISO 14044.....	11
Tabelle 3-3. Untersuchte Wirkungskategorien nach CML.	12
Tabelle 4-1. Geographischer Bezug der Teilprozesse im Modul A (Herstellung der Vorprodukte).....	16
Tabelle 4-2. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess A.01 (Herstellung von Strickgarn aus 100% Baumwolle).....	17
Tabelle 4-3. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess A.02 (Herstellung von Nähgarn aus Polyester Filamentgarn).....	17
Tabelle 4-4. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess A.03 (Herstellung der Textiletiketten (Pflege- & Produktkennzeichnung) aus Polyestergewebe).	17
Tabelle 4-5. Transportmodell tA.01 (Transport Baumwolle → A.01).....	17
Tabelle 4-6. Transportmodell tA.02 (Transport Polyester → A.02).	18
Tabelle 4-7. Transportmodell tA.03 (Transport Polyester → A.03).	18
Tabelle 4-8. Geographischer Bezug der Teilprozesse im Modul B (T-Shirt- Herstellung).....	18
Tabelle 4-9. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess B.01 (Herstellung eines Single Jersey (Ringstrickverfahren)).....	19
Tabelle 4-10. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess B.02 (Aufbereiten und Bleichen des gestrickten Single Jersey).....	19
Tabelle 4-11. Stoff- und Energieströme beim Finishing-Prozess. Submodul im Teilprozess B.03 (Finsihing und Krumpfen).....	20
Tabelle 4-12. Stoff- und Energieströme beim Prozess des Krumpfens. Submodul im Teilprozess B.03 (Finsihing und Krumpfen).	20
Tabelle 4-13. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess B.04 (Konfektionierung).	21
Tabelle 4-14. Transportmodell tB.01 (Transport Strickgarn → B.01).....	21
Tabelle 4-15. Transportmodell tB.02 (Transport Single Jersey, roh → B.02).....	21
Tabelle 4-16. Transportmodell tB.03 (Transport Single Jersey, final → B.04).....	21
Tabelle 4-17. Transportmodell tB.04 (Transport Nähgarn → B.04).....	22
Tabelle 4-18. Transportmodell tB.04 (Transport Produkt- & Pflegekennzeichnung → B.04).	22
Tabelle 4-19. Geographischer Bezug der Teilprozesse im Modul C (Handel und Vertrieb des T-Shirts).....	22
Tabelle 4-20. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess C.01 (Verpackung).....	22
Tabelle 4-21. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess C.02 (Lagerung und Distribution).	23
Tabelle 4-22. Transportmodell tC.01 (Transport T-Shirt → C.01).	23
Tabelle 4-23. Geographischer Bezug der Teilprozesse im Modul D (Nutzung und Pflege des T-Shirts).	24

Tabelle 4-24. Rezeptur eines repräsentativen Flüssigwaschmittels. Submodul im Teilprozess D.01 (Herstellung Waschmittel).	25
Tabelle 4-25. Formulierung eines repräsentativen Flüssigwaschmittels, Verpackung, und Transport des fertigen Endprodukts zum Verbraucher. Submodul im Teilprozess D.01 (Herstellung Waschmittel).	26
Tabelle 4-26. Materialzusammensetzung einer konventionellen Waschmaschine. Submodul im Teilprozess D.02 (Herstellung Waschmaschine).	27
Tabelle 4-27. Montage und Verpackung einer konventionellen Waschmaschine. Submodul im Teilprozess D.02 (Herstellung Waschmaschine).	27
Tabelle 4-28. Annahmen zur Materialzusammensetzung eines konventionellen Trockners. Submodul im Teilprozess D.03 (Herstellung Trockner).	28
Tabelle 4-29. Annahmen zur Montage und Verpackung eines konventionellen Trockners. Submodul im Teilprozess D.03 (Herstellung Trockner).	28
Tabelle 4-30. Annahmen zum Wäschepflegeverfahren entsprechend StiWa (2017).	29
Tabelle 4-31. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess D.04 (Wäschepflege \varnothing 43 °C).....	30
Tabelle 4-32. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess D.05 (Maschinentrocknung).....	31
Tabelle 4-33. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess D.06 (End-of-life Modell (Verwertungsmodell) der Verpackungsmaterialien).....	32
Tabelle 4-34. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess D.07 (End-of-life Modell (Verwertungsmodell) der Haushaltsgeräte).....	32
Tabelle 4-35. Transportmodell tD.01 (Transport T-Shirt → D.04).	33
Tabelle 4-36. Transportmodell tD.02 (Transport Verpackung → D.06).	33
Tabelle 4-37. Transportmodell tD.03 (Transport Haushaltsgeräte → D.07).	33
Tabelle 4-38. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess E.01 (End-of-life des abgetragenen T-Shirts).....	34
Tabelle 4-39. Transportmodell tE.01 (Transport T-Shirt → E.01).	34
Tabelle 5-1. Umweltwirkungen der unterschiedenen Lebenswegphasen eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts entsprechend ausgewählter Wirkungsabschätzungskategorien.	35
Tabelle A-1. Emissionen im Teilprozess B.02 (Aufbereiten und Bleichen des gestrickten Single Jersey).	65
Tabelle A-2. Emissionen im Teilprozess B.03 (Finishing und Krumpfen).	66
Tabelle A-3. Bilanzierung der Rezeptur eines repräsentativen Flüssigwaschmittels	67
Tabelle A-4. Approximation einer generischen Chemikalie (...chemical agent [proxy]).	68
Tabelle A-5. Approximation von Zitronensäure (...citric acid [proxy]).....	69
Tabelle A-6. Approximation von Duftstoffen (...fragrance [proxy]).....	69
Tabelle A-7. Bilanzierung des Prozesses der Formulierung eines repräsentativen Flüssigwaschmittels.....	69
Tabelle A-8. Approximation eines Produktionswerks für Flüssigwaschmittel (production plant [proxy]).....	70
Tabelle A-9. Approximation des Transports mit einem durchschnittlichen Pkw in Deutschland (DE: Car average fuel and EURO mix [proxy]).	70

Tabelle A-10. Bilanzierung der Materialzusammensetzung einer konventionellen Waschmaschine, bzw. konventionellen Trockners.....	70
Tabelle A-11. Bilanzierung der Montage und Verpackung einer konventionellen Waschmaschine, bzw. konventionellen Trockners.....	71
Tabelle A-12. Bilanzierung der Stoff- und Energieströme in den Teilprozessen D.04 und D.05 (Wäschepflege und Maschinentrocknung).....	71
Tabelle A-13. Bilanzierung der Abfallbehandlung in den Teilprozessen D.06 und D.07 (End-of-life der Verpackungsmaterialien und Haushaltsgeräte).....	71
Tabelle A-14. Approximation der Entsorgung von Siedlungsabfällen auf der Deponie (...landfill mix [proxy]).	71
Tabelle A-15. Bilanzierung des Transportaufwands im Transportmodell tD.01 (Transport T-Shirt → D.04).	72
Tabelle A-16. Bilanzierung des Transportaufwands im Transportmodell tD.02 und tD.03 (Transport von Verpackungsabfällen und verschlissenen Haushaltsgeräten)..	72
Tabelle A-17. Bilanzierung der Abfallbehandlung im Teilprozess E.01 (End-of-life des abgetragenen T-Shirts).....	72
Tabelle A-18. Bilanzierung des Transportaufwands im Transportmodell tE.01, d. h., Transport T-Shirt → E.01.).....	72
Tabelle A-19. Umweltwirkungen der unterschiedenen Lebenswegphasen eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts entsprechend ausgewählter Wirkungsabschätzungskategorien.	73

Abkürzungsverzeichnis

- ABS — Acrylnitril-Butadien-Styrol
- ADP — Abiotic Resource Depletion Potential (Ressourcenverbrauchspotenzial, elementar)
- AN — Annahme
- AP — Acidification Potential (Versauerungspotenzial)
- AS — Acryl, antistatisch
- BD — Bangladesch
- BR — Berechnung
- CML — Centrum voor Milieuwetenschappen
- CN — China
- CO₂-Äqv. — Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Äquivalente (Bezugseinheit Treibhauspotenzial)
- DCB-Äqv. — Dichlorbenzol (DCB)-Äquivalente (Bezugseinheit Ökotoxpotenzial, aquatisch)
- DE — Deutschland
- DQ — Datenquelle
- EB — Eigene Berechnung
- ED — Erhobene Daten
- EOl — End-of-life Modell (i. e. Verwertungsmodell)
- EP — Eutrophication Potential (Eutrophierung, terrestrisch)
- EU-28 — Europäische Union mit 28 Mitgliedstaaten
- FAEO — Nichtionische Tenside als Fettalkoholethoxylat, auch Laurylaminoxid
- FAES — Anionische Tenside als Fettalkoholethersulfate
- FAETP — Fresh-water Aquatic Ecotoxicity Potential (Ökotoxpotenzial, aquat. Frischwasser)
- FE — Funktionelle Einheit
- GLO — Global
- GWP — Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
- H₂O-Äqv. — Wasser (H₂O) Äquivalente (Bezugseinheit Ressourcenverbrauch, Wasser)
- HDPE — High Density Polyethylen
- ID — Indonesien
- IKW — Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e. V.
- IN — Indien
- ISO — International Organization for Standardization
- JP — Japan
- Kfz — Kraftfahrzeug
- LAS — Anionische Tenside als Dodecylbenzolsulfonate
- LDPE — Low Density Polyethylen
- LKW — Lastkraftwagen
- LU — Landnutzung (LU)
- MA — Malaysia
- MAETP — Marine Aquatic Ecotoxicity Potential (Ökotoxpotenzial, aquat. Salzwasser)
- MB — Waschmaschinenbeladung
- MT — Anteil der Maschinentrocknung
- PE — Polyethylen
- PEF — Product Environmental Footprint
- PEFCR — Product Environmental Footprint Category Rules
- PES — Polyesterfaserstoff
- PET — Polyethylenterephthalat
- PK — Pakistan
- PP — Polypropylen
- PS — Polystyrol
- PVC — Polyvinylchlorid
- Sb-Äqv. — Antimon (Sb) Äquivalente (Bezugseinheit Ressourcenverbrauch, elementar)
- SEPAWA — Vereinigung der Seifen-, Parfüm-, Kosmetik- und Waschmittelfachleute e. V.
- SO₂-Äqv. — Schwefeldioxid (SO₂)-Äquivalente (Bezugseinheit Versauerungspotenzial)
- TH — Thailand
- TR — Türkei
- WDP — Water Depletion Potential (Ressourcenverbrauch, Wasser)
- WHF — Waschwahigkeit
- WMD — Waschmitteldosierung
- WP — Waschprogramm

1. Einleitung

Die Methode der Ökobilanzierung hat sich seit vielen Jahren als Werkzeug zur Erfassung und Umsetzung des technischen Umweltschutzes bewährt (Basbagill et al., 2013; Golsteijn et al., 2015; ISO, 2006a, 2006b; JRC, 2010). Bilanziert werden dabei die Umweltwirkungen eines Produkts, eines Verfahrens oder einer Dienstleistung über deren gesamten Lebenszyklus, d. h. von der Nutzung stofflicher oder energetischer Ressourcen bis hin zur Entsorgung oder Wiederverwertung von Stoffen und Energieströmen am Ende der Nutzungsphase (ISO, 2006a, 2006b). Es lassen sich somit prozess- und produktbedingte Umweltlasten ganzheitlich erfassen, den Lebenswegphasen zuordnen, sowie Handlungsempfehlungen und Entscheidungen in Bezug auf Umweltschutzaspekte ableiten. Da Maßnahmen des produktintegrierten Umweltschutzes oft auch wirtschaftliche Vorteile mit sich bringen, dienen Ökobilanzen zunehmend auch als Informationsgrundlage für Entscheidungen in der Wirtschaft und Politik.

Auch der Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e. V. (IKW) beschäftigt sich intensiv mit den potenziellen Verringerungen von Umweltwirkungen in seinen Produktbereichen. Dabei sieht der Verband seinen Verantwortungsbereich nicht nur auf die Produktion, sondern auch auf die Nutzung und Entsorgung der Produkte seiner Mitgliedsfirmen erstreckt. Neben regelmäßig erscheinenden Nachhaltigkeitsberichten für die Wasch-, Pflege- und Reinigungsmittelbranche in Deutschland (IKW, 2017), verfügt der IKW auch über ältere Ökobilanzen zu Waschmitteln, welche jedoch bereits aus dem Jahr 2001 stammen und nur begrenzt Rückschlüsse auf Produkte neuester Generation zulassen. Ein Ziel des IKW ist daher die ökobilanzielle Neubewertung aktueller Wäschepflegepraktiken. In Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Sustainable Engineering der TU Berlin, wurde hierzu am 1. April 2018 das gemeinschaftliche Forschungsprojekt „Ökobilanzielle Bewertung der Herstellung, Pflege und Entsorgung eines handelsüblichen weißen Baumwolle T-Shirts in Deutschland“ ins Leben gerufen. Die Umsetzung und Ergebnisse dieser Studie werden im vorliegenden Bericht dokumentiert und zusammengefasst.

2. Festlegung des Ziel und Untersuchungsrahmens

Der Aufbau und die Durchführung dieser Studie, folgen den internationalen Standards zur Ökobilanzierung ISO 14040 und ISO 14044 (ISO, 2006a, 2006b). Es ist Ziel und Aufgabe dieses Berichts zu dokumentieren, dass die Ergebnisse und der Prozess der Ergebnisermittlung den Anforderungen der internationalen Standards genügen und dies durch einen externen Sachverständigen in Form einer kritischen Prüfung („Critical Review“) überprüfbar ist.

Im Kapitel 2.1 wird zunächst das Ziel der Studie („Goal“) definiert. Teilaspekte der Zieldefinition, wie Gründe für die Durchführung der Studie, die beabsichtigte Art und Form der Anwendung und Zielgruppen, werden in anschließenden Unterkapiteln erläutert.

2.1. Ziel der Studie

Ziel der Studie ist die lebenszyklusbasierte ökobilanzielle Bewertung eines handelsüblichen weißen Baumwolle T-Shirts, welches in Deutschland getragen, gewaschen und entsorgt wird. Fokussiert wird dabei primär auf die Umweltwirkungen der Nutzungsphase, welche ausschließlich auf der Grundlage der Wäschepflegeverfahren berechnet werden. Das Tragen des T-Shirts und hieraus bedingte, mögliche Umweltwirkungen (z. B. durch Faserverluste) ist nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Die Ergebnisse dieser Studie sind:

- A. Eine Sachbilanz über die Herstellung, Nutzung und Pflege, und Entsorgung handelsüblicher weißer Baumwolle T-Shirts in Deutschland.
- B. Eine Auswahl quantifizierter Umweltwirkungen der einzelnen Lebenswegphasen.

Die Auswertung der Ergebnisse findet auf der Ebene definierter Lebenswegphasen statt, wobei die Umweltwirkungen der Herstellung und Entsorgung denen verschiedener Wäschepflegeverfahren im privaten Haushalt gegenübergestellt werden sollen (siehe auch Abbildung 2-1.).

2.2. Gründe der Durchführung

Durch die ökobilanzielle Bewertung des Lebensweges eines in Deutschland getragenen weißen Baumwolle T-Shirts erwartet der IKW wissenschaftlich fundierte Informationen über die Umweltwirkungen aktueller Wäschepflegepraktiken. Die Ergebnisse sollen Verbandsunternehmen beispielsweise als Informationsgrundlage für eine umweltoptimierte Produktentwicklung dienen bzw. Rückmeldung zu laufenden oder geplanten Nachhaltigkeitsinitiativen liefern. Auch die Aussicht, Ergebnisse der Studie in der Öffentlichkeitsarbeit einsetzen zu können, gibt Anlass zu diesem Forschungsvorhaben.

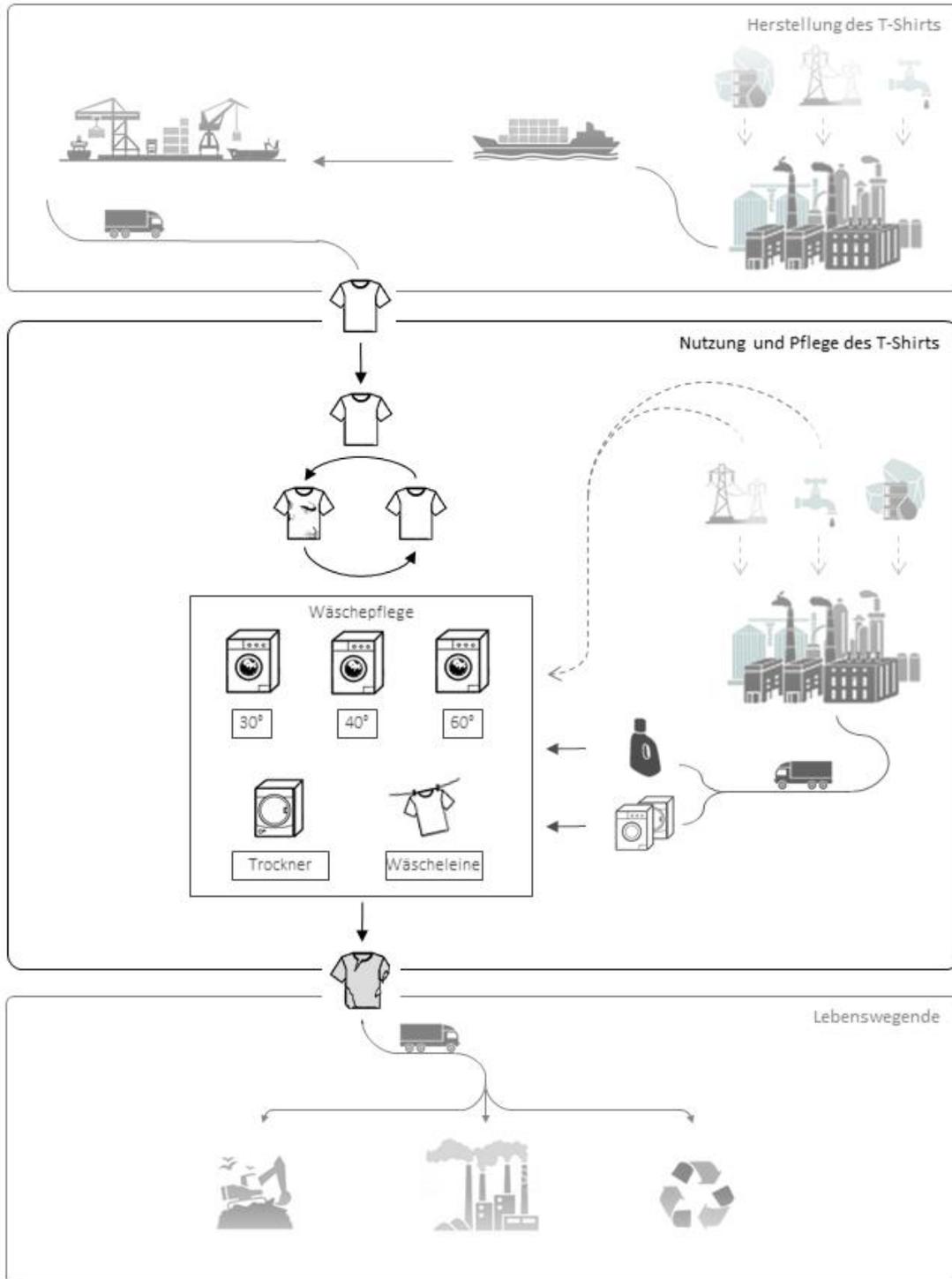


Abbildung 2-1. Lebensweg eines weißen Baumwolle T-Shirts (schematisch).

2.3. Anwendung der Studie

Diese Studie wird basierend auf den technischen Realitäten und naturwissenschaftlichen Fakten unter Verwendung von Primär- und Sekundärdaten durchgeführt. Die Studienergebnisse dienen in erster Linie der Information der Mitgliedsunternehmen des IKW. Neben der IKW-internen Verwendung ist geplant, Teilergebnisse im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit des IKW einzusetzen. Diese wendet sich an Kunden und Aktionäre von Mitgliedsunternehmen sowie interessierte Kreise, z. B. aus Gesellschaft, Wissenschaft und Politik. Eine Verwendung der Ergebnisse für vergleichende Aussagen, die an die Öffentlichkeit gerichtet sind, ist nicht vorgesehen.

Um Öffentlichkeit in wissenschaftlichen Kreisen zu erzeugen, wird erwogen, die Studienergebnisse auf dem kommenden SEPAWA Kongress in Berlin (Oktober 2019) zu präsentieren (durch die Autoren der TU Berlin).

2.4. Zielgruppen

Zielgruppe sind in erster Linie die Mitgliedsunternehmen des IKW, ferner Zulieferer und Kunden, sowie interessierte Dritte, deren Anfragen auf Basis der Ergebnisse der Studie beantwortet werden können. Eine Weitergabe der Studie obliegt dem IKW und erfolgt vollständig oder in Teilen, Bezug nehmend auf die jeweilige Anfrage. Jedoch ist darauf zu achten, dass Ergebnisse nicht aus dem Kontext der Gesamtstudie mit dessen definiertem Ziel und Untersuchungsrahmen sowie den nur im Gesamtkontext geltenden Randbedingungen gerissen werden und somit vereinfachend falsch interpretiert werden können.

3. Untersuchungsrahmen der Studie

Im Folgenden werden die Funktionen (Leistungsmerkmale) des untersuchten Systems sowie die verschiedenen Aspekte des Untersuchungsrahmens („Scope“) der Studie definiert und erläutert.

3.1. Funktionelle Einheit

Das weiße Baumwolle T-Shirt dient der Bekleidung eines Menschen durchschnittlicher Konfektion (unisex). Da kein Vergleich von Produktvarianten vorgesehen ist, bedarf es keiner näheren Beschreibung des Nutzens und der Funktion des T-Shirts. Als funktionelle Einheit (FE) und Referenzfluss wird ein weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen festgelegt. Annahmen zum spezifischen Gewicht und der Waschhäufigkeit stützen sich auf Expertenauskünfte und Werte in fachspezifischen Publikationen, welche im Kapitel 3.2 näher erläutert werden. Die Wäschepflege (Nutzungsphase) erfolgt in Deutschland. Die Wäschepflege zwischen den Tragephasen dient dem Werterhalt und Auffrischen des getragenen Textilstücks.

3.2. Untersuchtes Produktsystem

Das untersuchte Produktsystem dieser Studie umfasst den Lebensweg eines handelsüblichen weißen Baumwolle T-Shirts, welches in Deutschland getragen, gewaschen und entsorgt wird. Die spezifischen Textileigenschaften sollen dabei dem europäischen Durchschnitt gehandelter Baumwolle T-Shirts entsprechen. Hierzu werden folgende Annahmen zur Materialzusammensetzung und Lebensdauer getroffen (Tabelle 3-1):

Tabelle 3-1. Textileigenschaften des untersuchten Baumwolle T-Shirts.

Kennzeichen	Spezifikation	Funktion	Menge*	Einheit	DQ**
Material	Baumwolle, gekämmt (verarbeitet im Rundstrickverfahren)	Stoff	154.00	g	[1]
	Polyesterfaserstoff (PES), gewebt	Pflegehinweis	0.60	g	[1]
		Markenetikett	0.25	g	
	Polyesterfaserstoff (PES), mehrfach gezwirnt (80 Nm stark ^a)	Nähgarn	1.00	g	[1]
Masse	Summe verwendeter Materialien	T-Shirt (FE)	155.85	g	EB
Lebensdauer	Anzahl der Wäschen	Nutzenerhalt	44	Anzahl	[1, 2], AN

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: [1] - (PEFCR, 2017); [2] - (Gwozdz et al., 2017); EB – Eigene Berechnung auf Grundlage von Literaturdaten; AN - Annahme beruhend auf Angaben in Gwozdz et al., (2017) und dem 1. Entwurf der T-Shirt PEFCR (PEFCR, 2017). Die Plausibilität dieser Annahme ist nach Einschätzung der im Begleitkreis vertretenen Experten gegeben (siehe auch Kapitel 3.6).

^a Garnstärke nach metrischer Längenummerierung. Nummer metrisch [Nm] kennzeichnet das Verhältnis Länge je Masse mit der Einheit m/ g.

Annahmen zur Bereitstellung der Roh- und Werkstoffe, der Textilherstellung sowie der Produktion von Betriebs- und Hilfsmitteln spiegeln den aktuellen Stand der Technik wider und berücksichtigen die geographische Diversität dominierender Produktionsrouten.

Die regelmäßige Pflege des Produkts sichert einen andauernden Nutzen. Bei der Wäschepflege wird versucht, das Verhalten deutscher Durchschnittshaushalte im Jahr 2018 abzubilden. Annahmen zu Wäschepflegepraktiken beinhalten Festlegungen in Bezug auf die Art, Form und Dosierung der verwendeten Waschmittel, die genutzte Waschmaschine und das gewählte Programm, als auch die Art und Weise der Wäschetrocknung. Da die Wäschepflege für den Nutzenerhalt des T-Shirts von zentraler Bedeutung ist, werden Annahmen zum Wäschepflegeverfahren im Rahmen einer Szenarienanalyse variiert. Hierzu sollen folgende Pflegeprozesse betrachtet werden:

- Einsatz von Flüssigwaschmittel bei einer Waschtemperatur von 30 °C
- Einsatz von Flüssigwaschmittel bei einer Waschtemperatur von 40 °C
- Einsatz von Flüssigwaschmittel bei einer Waschtemperatur von 43.3 °C
- Einsatz von Flüssigwaschmittel bei einer Waschtemperatur von 60 °C

Eine detaillierte Beschreibung aller Prozessschritte und der dazugehörigen Modellannahmen findet sich im Kapitel 4.6.

3.3. Grenzen des Produktsystems

Die Bilanzierung umfasst den gesamten Lebensweg eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts, d. h. von der Nutzung stofflicher oder energetischer Ressourcen für die T-Shirt-Herstellung entlang globaler Produktionsrouten, bis hin zur Nutzung (Pflege), Verwertung und Entsorgung des T-Shirts in Deutschland. Die einzelnen Lebenswegphasen des T-Shirts (im Folgenden als Module bezeichnet) werden dabei wie folgt unterschieden (vgl. Abbildung 3-1):

- A. Herstellung der Vorprodukte (Baumwolle, PES, etc.)
- B. T-Shirt-Herstellung (Herstellung eines weißen Baumwolle T-Shirt)
- C. Handel und Vertrieb des T-Shirts
- D. Nutzung und Pflege des T-Shirts
- E. Lebenswegende (End-of-life Modell)

In den Systemgrenzen sind alle Teilprozesse der Lebenswegphasen eingeschlossen. Diese umfassen z. B. im Modul der T-Shirt-Herstellung den Prozess des Strickens (Ringstrickverfahren), das Aufbereiten und Bleichen, Finishing und Krumpfen und die Konfektionierung des T-Shirts (Abbildung 3-1). Zentraler Gegenstand der Untersuchung ist die Nutzung und Pflege des T-Shirts (Modul D). Entsprechend der Definition der funktionellen Einheit (Kapitel 3.1) wird die Wäschepflege während der Nutzung des T-Shirts 44-mal durchlaufen. Die Möglichkeit der Secondhand-Nutzung ist in der Annahme zur Waschkhäufigkeit bereits berücksichtigt.

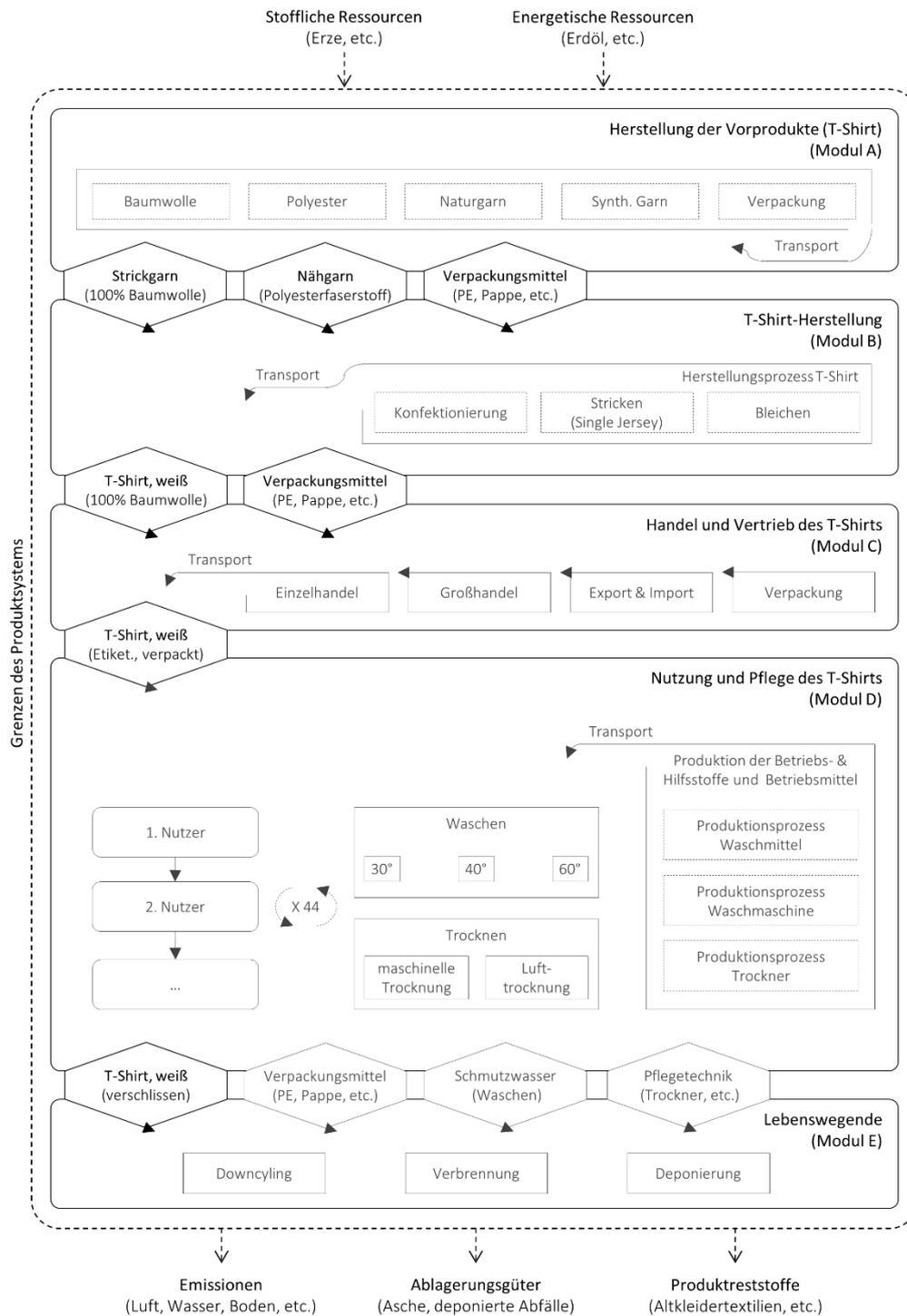


Abbildung 3-1. Grenzen des Produktsystems und Verknüpfung der Prozessmodule (schematisch).

Auf die Nutzungsphase folgt das „End-of-life“ Modell (d. h. Verwertungsmodell), in dem das verschlissene T-Shirt unterschiedlichen Verfahren der stofflichen und energetischen Verwertung zugeordnet wird. Betrachtet werden dabei die Verwertungsverfahren; „Downcycling“ (Zweitverwertung), Verbrennung und Deponierung (Abbildung 3-1).

Die Systemgrenze wird von Ressourcen für die Bereitstellung der Roh- und Werkstoffherstellung, Emissionen in Luft, Wasser und Boden, Ablagerungsgütern sowie Textilreststoffen überschritten (siehe Abbildung 3-1).

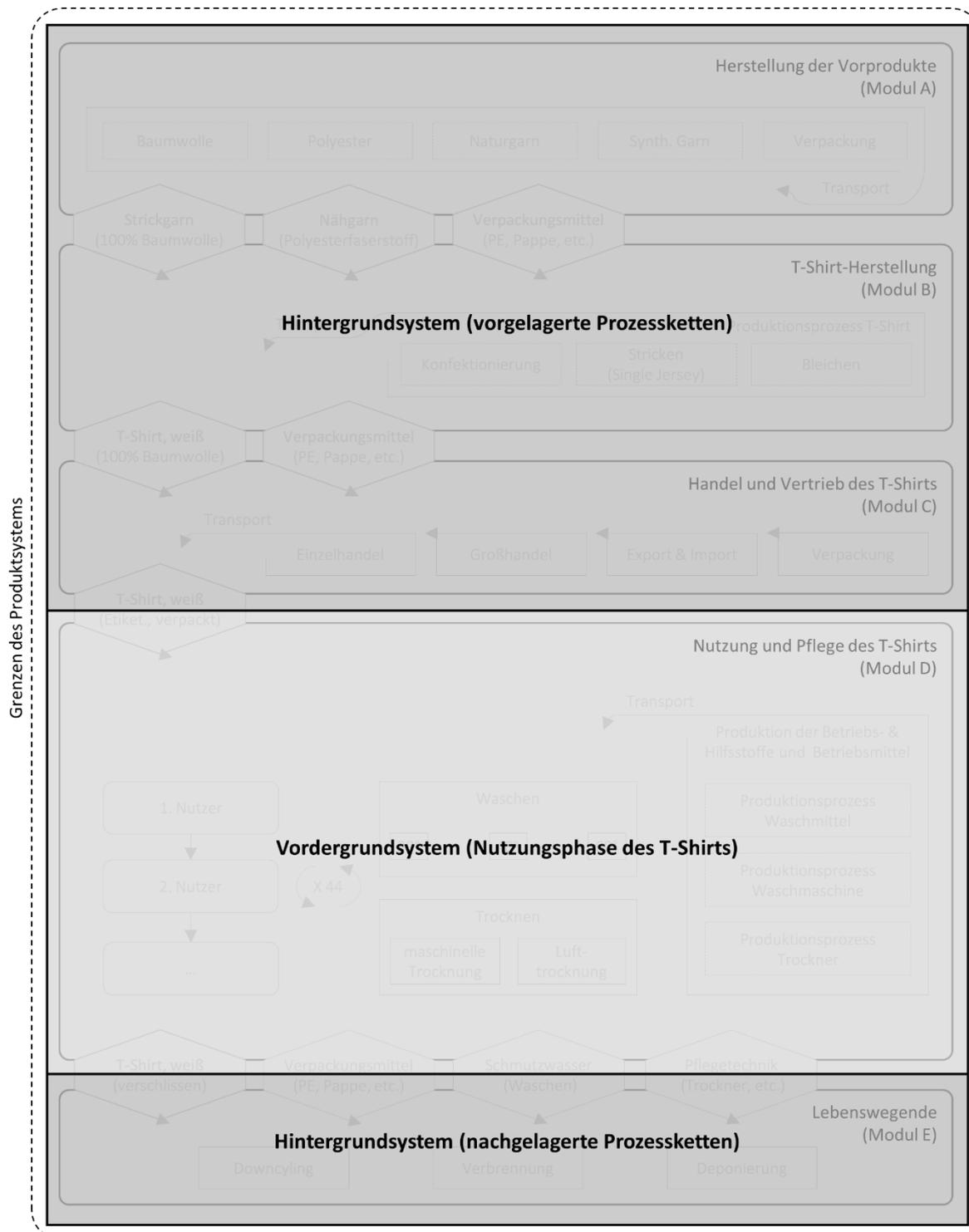


Abbildung 3-2. Hintergrund- und Vordergrundsystem der betrachteten Prozesskette.

Zentraler Gegenstand der Untersuchung (Vordergrundsystem) ist die Pflege des T-Shirts (Modul D). Die Teilprozesse innerhalb der Module A, B, C und E bilden das Hintergrundsystem

(siehe Abbildung 3-2). Eine detaillierte Beschreibung der berücksichtigten Teilprozesse in den unterschiedenen Modulen ist den Kapiteln 4.1 und 4.2 zu entnehmen.

3.4. Abschneidekriterien

Die Modellierung des Lebensweges wurde auf Basis aller verfügbaren Energie- und Masseinformationen umgesetzt, dabei wurden Energie- und Massebezogene Abschneidekriterien von 1 % angewandt. Anhand einer Prüfung der Umweltrelevanz wird sichergestellt, dass keine relevanten Flüsse abgeschnitten wurden. Dem Softwaresystem GaBi 8.7 (mit DB version 2018 SP36) entnommene Datensätze zur Roh- und Werkstoffherstellung, Energiebereitstellung und Verarbeitungsverfahren berücksichtigen implizit die dort verwendeten Abschneidekriterien, was in der öffentlichen Dokumentation entsprechend beschrieben ist (GaBi 8.7, 2018).

3.5. Allokationsmethode

Im Vordergrundsystem wurde keine Allokation vorgenommen. Im Hintergrundsystem vorgenommene Allokationen wurden der Dokumentation der Datenbank entnommen (GaBi 8.7, 2018). Das zugrunde gelegte „End-of-Life“ Modell unterscheidet bei der stofflichen und energetischen Verwertung des verschlissenen T-Shirts zwischen den Verfahren „Downcycling“, Verbrennung und Deponierung. Die bei der Verbrennung erzeugte Energie wird durch Systemraumerweiterung in das Gesamtsystem eingeschlossen, wodurch eine Allokation vermieden wird. Textilreststoffe, die eine Zweitverwertung erfahren (d. h. Downcycling), etwa in der Verwendung als Putzutensil oder Dämmmaterial, verlassen als Produktreststoffe wertneutral (d. h. ohne Umweltwirkung/-lasten) die Systemgrenze. Gutschriften im Wert eingesparter Produktionswege (d. h. Herstellung von Putzutensil oder Dämmmaterial) werden nicht vergeben, doch müssen so den Produktreststoffen auch keine Umweltlasten für dessen Entsorgung zugerechnet werden.

3.6. Datenerhebung und Anforderung an die Datenqualität

Die Modellierung der in der Sachbilanz abgebildeten Prozesse erfolgte unter Einbeziehung verschiedener Datenquellen. Verwendete Prozessdaten entstammen in erster Linie Fachpublikationen, sowie Arbeitsschriften, die im Rahmen Pilotphase des „Product Environmental Footprint (PEF)“ veröffentlicht wurden (European Commission, 2018a, 2015). Während der 4.5-jährigen Pilotphase wurden für mehr als 20 Produkte, u. a. für Flüssigwaschmittel und T-Shirts, spezifische Produktkategorieregeln (PEFCRs – Product Environmental Footprint Category Rules) entwickelt (European Commission, 2018b). Diese PEFCRs enthalten – neben methodischen Ansätzen zur Berechnung der Umweltwirkungen von

Flüssigwaschmitteln und Textilien – eine Übersicht/Auflistung von Prozess- und Inventardaten, die bei der Modellierung der Hintergrundsysteme verwendet wurden. Für die Modellierung einzelner Teilprozesse im Vordergrundsystem (Nutzung und Pflege des T-Shirts) wurden in der vorliegenden Studie auch Primärdaten^a verwendet (siehe Kapitel 4.2). An Stellen, wo keine Primär- oder Sekundärdaten^b verfügbar waren, wurden Annahmen getroffen bzw. Näherungswerte verwendet, wobei abgeschätzte Datensätze grundsätzlich als solche gekennzeichnet sind. Zur Absicherung der getroffenen Annahmen und Ergänzung der Datengrundlage wurde ein Begleitkreis aus Vertretern von Prüfinstituten, Wissenschaft und Industrieverbänden eingerichtet. Zu den im Begleitkreis vertretenen Institutionen zählen:

- GermanFashion Modeverband Deutschland e.V.
- Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
- Hohenstein Laboratories GmbH & Co.KG
- Industrievereinigung Chemiefaser e. V.
- Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e. V.

Der geographische Bezug der Datensätze im Hintergrundsystem ist größtenteils (sofern Daten verfügbar waren) landesspezifisch, ansonsten europäisch oder global (in dieser Priorisierung) gewählt. Prozessdaten zur Nutzung, Pflege und Entsorgung des T-Shirts beziehen sich vorrangig auf Deutschland. Bei den Inventardaten zur Waschmittelherstellung wurde Europa als geographischer Erfassungsbereich gewählt.

Die Modellierung der vor- und nachgelagerten Prozessketten erfolgte unter Zuhilfenahme des durch die thinkstep AG entwickelten und vertriebenen Softwaresystems GaBi 8.7. Verfügbare Inventare, etwa für die Roh- und Werkstoffherstellung, der Produktion von Betriebs- und Hilfsmitteln sowie der Energiebereitstellung spiegeln den aktuellen technischen Stand unter Berücksichtigung der geographischen Lage wider. Nähere Erläuterungen zu diesen Datensätzen können der öffentlich erhältlichen GaBi-Dokumentation entnommen werden (GaBi 8.7, 2018). Prozessketten und Datensätze, die nicht im GaBi 8.7 Softwaresystem hinterlegt sind, wie etwa spezifische Bestandteile des modellierten Waschmittels (Teilprozess im Modul D), wurden durch gleichwertige Prozesse (d. h. Prozesse mit gleichwertiger Funktion und Umweltlast) substituiert oder auf Basis von gemittelten Industriedaten und Literaturangaben in vergleichbarer Qualität neu erstellt. Eine ausführlichere Beschreibung der modellierten Teilprozesse des Vorder- und Hintergrundsystems und der dabei verwendeten Primär- und Sekundärdaten finden sich im Kapitel 4.2. Die Anforderungen an die Datenqualität basieren auf den Vorgaben der ISO 14044 und sind unten stehender Tabelle 3-2 zu entnehmen (ISO, 2006b).

^a Daten, die durch eine eigens durchgeführte Datenerhebung unmittelbar gewonnen wurden.

^b Daten, die nicht direkt erhoben wurden, sondern der Literatur entnommen wurden, bzw. aus Primärdaten durch Modellier- oder Verarbeitungsschritte hervorgehen.

Tabelle 3-2. Anforderungen an die Datenqualität entsprechend ISO 14044 (ISO, 2006b).

Parameter	Beschreibung	Anforderungen
Zeitbezogener Erfassungsbereich	Alter und der kleinste Zeitrahmen, in dem die Daten liegen sollten.	Die Daten spiegeln die Situation zwischen 2010 und 2018 wider. Es wurde sichergestellt, dass verwendete Daten in keinem Fall älter als 10 Jahre sind. Das Datenalter wird dokumentiert.
Geographischer Erfassungsbereich	Geographischer Raum, aus dem die Daten stammen sollten.	Die Daten zur Nutzung und Pflege des T-Shirts sollen die aktuelle Situation (2018) in deutschen Haushalten abbilden. Daten für die Produktion von Roh- und Werkstoffen, der T-Shirt-Herstellung sowie der Produktion von Betriebs- und Hilfsmitteln berücksichtigen die geographische Vielfalt dominierender Produktionsrouten. Der Strom-Mix wurde auf das betrachtete Land bezogen.
Technologischer Erfassungsbereich	Technologie-Mix	Die Daten geben den aktuellen Stand der Technik in der Textil- und Bekleidungsproduktion (global) und Wäschepflege (Deutschland) wieder.
Präzision	Maß für die Schwankungsbreite der Werte für alle angegebenen Daten (z. B. Varianz).	In der Studie werden spezifische und repräsentative Daten verwendet. An Stellen, an denen Annahmen getroffen werden, können Schwankungen auftreten. Für diese Fälle werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt.
Vollständigkeit	Bestimmung, ob alle relevanten Input- und Outputdaten enthalten sind.	Einfache Datenüberprüfungen – z. B. anhand von Massenbilanzen – werden durchgeführt. Die Plausibilität von Annahmen und Näherungswerten wird anhand von Literaturdaten überprüft, bzw. über eine eingehende Prüfung durch Experten des IKW sichergestellt.
Repräsentativität	Qualitative Einschätzung, inwiefern die Daten den zeitlichen, geographischen und technologischen Rahmen wiedergeben.	Die Daten erfüllen den definierten zeitlichen, geographischen und technologischen Rahmen.
Konsistenz	Qualitative Einschätzung, ob die Methode der Studie auf die verschiedenen Komponenten der Analyse einheitlich angewendet wird.	Die gewählte Methode wird einheitlich für alle Komponenten der Analyse angewendet.
Vergleichpräzision	Qualitative Einschätzung für den Umfang, in dem ein unabhängiger Ersteller mit den Informationen über die Methode und die Datenwerte die in der Studie angegebenen Ergebnisse reproduzieren kann.	Informationen, die Daten und die Methode betreffen, ermöglichen eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Aus Geheimhaltungsgründen werden Informationen zum Ursprung ausgewählter Primärdaten jedoch nicht im finalen Bericht zur Verfügung gestellt.
Datenquellen	Bestimmung der verwendeten Datenquellen.	Die Daten stammen aus wissenschaftlich fundierten Quellen und Datenbanken.
Datenunsicherheit	Quantifizierung der Unsicherheit der verwendeten Daten.	Die den verwendeten Daten innewohnende Unsicherheit wird anhand der im PEF-Guide vorgestellten semi-quantitativen Bewertungsmethode ermittelt.

3.7. Methode der Wirkungsabschätzung

Die Aufgabe der Wirkungsabschätzung ist es, die in der Sachbilanz erhobenen Daten in Hinblick auf bestimmte Umweltwirkungen, sogenannte Wirkungskategorien, zu untersuchen. Nachfolgend werden die in dieser Studie betrachteten Wirkungskategorien aufgeführt und erläutert.

Die Wirkungsabschätzung basiert auf den international akzeptierten Methoden und Daten, die vom Centrum voor Milieuwetenschappen (CML) in Leiden zusammengetragen wurden (Leiden University, 2012). In der vorliegenden Studie erfolgt die Wirkungsabschätzung anhand der folgenden Wirkungskategorien (Tabelle 3-3):

Tabelle 3-3. Untersuchte Wirkungskategorien nach CML (GaBi 8.7, 2018; Leiden University, 2012).

Wirkungskategorie*	Charakterisierungsmethode**	Bezugseinheit
Ressourcenverbrauch, elementar (ADP)	CML 2016	kg Sb-Äqv.
Versauerungspotenzial (AP)	CML 2016	kg SO ₂ -Äqv.
Eutrophierung, terrestrisch (EP)	CML 2016	mol N-Äqv.
Ökotoxpotenzial, aquat. Frischwasser (FAETP)	CML 2016	kg DCB-Äqv.
Treibhauspotenzial (GWP)	CML 2016	kg CO ₂ -Äqv.
Landnutzung (LU)	Land use midpoint (v1.09, LANCA Modell)	DIV. ^a
Ökotoxpotenzial, aquat. Salzwasser (MAETP)	CML 2016	kg DCB-Äqv.
Ressourcenverbrauch, Wasser (WDP)	Midpoint (v1.09, AWARE Modell)	m ³ H ₂ O-Äqv.

*Abkürzungen beziehen sich auf die englische Bezeichnung der einzelnen Wirkungskategorien. **Nähere Informationen zu den verwendeten Charakterisierungsmethoden können der GaBi GaBi 8.7 Dokumentation entnommen werden (siehe <http://www.gabi-software.com/deutsch/my-gabi/gabi-documentation/gabi-lcia-dokumentation/>).

^a Diverse: Das LANCA-Modell bewertet die Umweltwirkungen der Landnutzung auf der Grundlage verschiedener Indikatoren deren Ergebnisse in einem dimensionlosen Index zusammengefasst werden.

Wirkungsabschätzungsergebnisse sind relative Aussagen und machen keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken. Die optionalen Bestandteile der Wirkungsabschätzung (Normierung, Ordnung, Gewichtung) werden in dieser Studie wegen des subjektiven Charakters nicht ausgeführt (ISO, 2006b).

3.8. Art und Methode der Auswertung

Die Auswertung wird entsprechend den in ISO 14044 geforderten Bestandteilen durchgeführt (ISO, 2006b). Diese umfassen:

- Identifizierung der signifikanten Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzungs-Phasen der Ökobilanz
- Beurteilung der Vollständigkeit, Sensitivität und
- Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen.

3.9. Kritische Prüfung

Unter Berücksichtigung einer möglichen Publikation von Teilergebnissen wird eine kritische Prüfung gemäß ISO 14040/14044 vorgenommen. Die Prüfung erfolgt gemäß Kapitel 6.2 der ISO 14044 durch einen externen Sachverständigen (ISO, 2006b). Die Prüfung wird von Dr.-Ing. Martin Baitz (Director Content at thinkstep AG) durchgeführt. Das Gutachten wird in den Anhang A des Berichtes aufgenommen.

3.10. Art des Berichtes

Der vorliegende Bericht dient der vollständigen Dokumentation der Studie, als Grundlage für die kritische Prüfung und als technischer Bericht für die IKW-interne Verwendung. Als wesentliches Anwendungsfeld dieser Studie wird der Prozess der umweltgerechten Produktentwicklung in den IKW-Mitgliedsunternehmen angenommen/angestrebt. Auszüge und Ergebnisse des Berichtes werden ggf. zielgruppenorientiert aufbereitet und in den Kommunikationsmedien des IKW veröffentlicht. Der IKW wird zu gegebener Zeit entscheiden, ob die Studienergebnisse im Rahmen einer branchenspezifischen Konferenz auch einem wissenschaftlichen Publikum vorgestellt werden (siehe Kap. 2.3).

4. Sachbilanz

Die folgenden Kapitel geben Auskunft über die Modellierung der unterschiedenen Prozessmodule, die bei der Modellierung verwendeten Prozess-/Inventardaten, sowie die Sachbilanzergebnisse relevanter Teilprozesse.

4.1. Datengrundlage

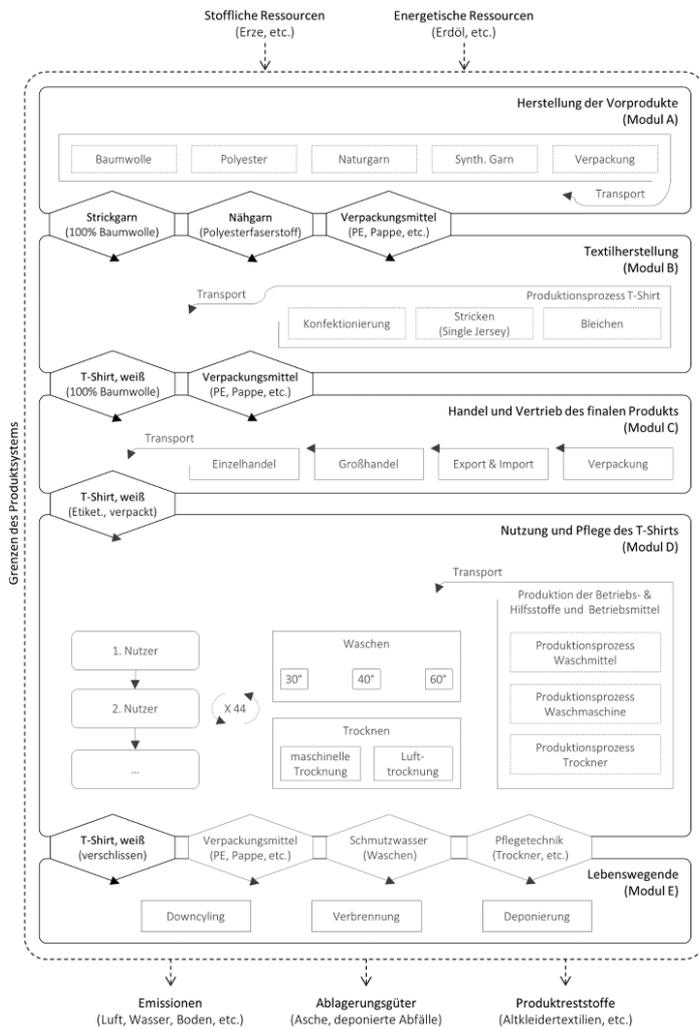
Die bei der Modellierung des Produktlebenswegs (siehe Kapitel 3.2) zugrundegelegten Stoff- und Energieströme wurden teilweise eigens erhoben (Primärdaten), teilweise aus publizierten Inventar-/Prozessdaten entnommen und teilweise extrapoliert. Verwendete Sekundärdaten entstammen in erster Linie bestehenden Fallstudien zu Umweltwirkungen von Flüssigwaschmitteln (PEFCR, 2015a) und Bekleidungsartikeln (PEFCR, 2017, 2015b), die im Rahmen der PEF-Initiative veröffentlicht wurden, sowie einer Studie von Jewell et al. (2017), welche sich mit den Umweltwirkungen verschiedener Baumwolltextilien befasst. Zusätzlich wurden Inventar-/Verbrauchsdaten von Yamaguchi et al. (2011), Yuan et al. (2016), KBA (2013), Statistisches Bundesamt (2017) und StiWa (2017) berücksichtigt. Die Modellierung eines repräsentativen Waschmittels erfolgte unter vorrangiger Verwendung von Primärdaten. Alle verwendeten Sekundärdaten entstammen wissenschaftlich fundierten Studien, welche öffentlich zugänglich sind. An Stellen, wo keine Primär- oder Sekundärdaten verfügbar waren, wurden Annahmen getroffen bzw. Näherungswerte verwendet, wobei abgeschätzte Datensätze grundsätzlich als solche gekennzeichnet sind.

Die Datensätze für die vor- und nachgelagerten Prozessketten, etwa für die Produktion von Betriebs- und Hilfsmitteln, der Energiebereitstellung und Wasserversorgung, sowie für die Ausgangsrohstoffe, wie beispielsweise Baumwolle und Polyesterfaserstoffe, wurden der Bilanzierungssoftware GaBi 8.7 entnommen (siehe <http://www.gabi-software.com/deutsch/datenbanken/gabi-daten-suche/> zum Nachschlagen der Dokumentation der Hintergrunddaten in GaBi 8.7). Der geographische Bezug der Datensätze wurde nach Möglichkeit landesspezifisch und in Entsprechung aktueller globaler Produktionsrouten gewählt. Vor- und nachgelagerte Prozessketten die nicht in GaBi 8.7 abgebildet sind, wie etwa die Herstellung bestimmter Bestandteile des modellierten Waschmittels (Teilprozess im Modul D), wurden durch gleichwertige Prozesse (d. h. Prozesse mit gleichwertiger Funktion und Umweltlast) substituiert oder auf Basis von gemittelten Industriedaten und Literaturangaben in vergleichbarer Qualität (siehe http://www.gabi-software.com/fileadmin/Documents/GaBi_Modelling_Principles_2018.pdf) konsistent zu den existierenden Daten von den Autoren neu erstellt.

4.2. Modellierung

Gegenstand der Modellierung ist die ganzheitliche Abbildung des Lebensweges eines weißen Baumwolle T-Shirts in Deutschland. Betrachtet werden dabei die in Kapitel 3.3 unterschiedenen Prozessmodule und deren untergeordnete Teilprozesse. Der Aufbau des

Modells und die funktionellen Zusammenhänge der unterschiedenen Prozessmodule und Teilprozesse kann der Abbildung 4-1 entnommen werden.



- | # | Prozessmodul |
|-------|---|
| # | <u>Teilprozess</u> |
| A | Herstellung der Vorprodukte (T-Shirt) |
| A.01 | Strickgarn (100% Baumwolle) |
| A.02 | Nähgarn (PES-Filamentgarn) |
| A.03 | Textiletiketten (PES-Gewebe) |
| tA.01 | Transport Baumwolle → A.01 |
| tA.02 | Transport Polyester → A.02 |
| tA.03 | Transport Polyester → A.03 |
| B | T-Shirt-Herstellung |
| B.01 | Ringstrickverfahren |
| B.02 | Aufbereiten und Bleichen |
| B.03 | Finishing und Krumpfen |
| B.04 | Konfektionierung |
| tB.01 | Transport Strickgarn → B.01 |
| tB.02 | Transport Single Jersey, roh → B.02 |
| tB.03 | Transport Single Jersey, final → B.05 |
| tB.04 | Transport Nähgarn → B.05 |
| tB.05 | Transport Produktkennz. → B.05 |
| C | Handel und Vertrieb des T-Shirts |
| C.01 | Verpackung |
| C.02 | Lagerung und Distribution |
| tC.01 | Transport T-Shirt → C.01 |
| D | Nutzung und Pflege des T-Shirts |
| D.01 | Herstellung Waschmittel |
| D.02 | Herstellung Waschmaschine |
| D.03 | Herstellung Trockner |
| D.04 | Wäschepflege 43° (ø) |
| D.05 | Trocknen |
| D.06 | EoL - Verpackungsmaterialien |
| D.07 | EoL - Haushaltsgeräte |
| tD.01 | Transport T-Shirt → D.04 |
| tD.02 | Transport Verpackung → D.06 |
| tD.03 | Transport Haushaltsgeräte → D.07 |
| E | Lebenswegende (T-Shirt) |
| E.01 | EoL - T-Shirt |
| tE.01 | Transport T-Shirt → E.01 |

Abbildung 4-1. Modellhafte Betrachtung des Lebensweges eines handelsüblichen weißen Baumwolle T-Shirts. Auflistung relevanter Prozessmodule und der dazugehörigen Teilprozesse.

Die Modellierung der einzelnen Teilprozesse wurde auf Basis aller verfügbaren Masseninformationen (Sekundär- und Primärdaten) umgesetzt. Für die Modellierung der Energie- und Wasserbereitstellungsprozesse wurden vorrangig standortspezifische Daten verwendet (vgl. Kapitel 3.6). Um die Umweltwirkungen des T-Shirts berechnen zu können, müssen die Verbrauchswerte an Strom, Wasser, Betriebs- und Hilfsmitteln in den einzelnen Teilprozessen mit den entsprechenden Vorketten zu ihrer Bereitstellung verknüpft werden. Die Ergänzung aller Vorketten-, Zuliefer- und Hintergrunddaten erfolgte unter Zuhilfenahme der Bilanzierungssoftware GaBi 8.7. Einzelheiten zu den in GaBi 8.7 modellierten Bereitstellungsketten finden sich im Anhang B.

Die folgenden Kapitel erläutern die Modellierung der Teilprozesse in den unterschiedenen Prozessmodulen. Im Fokus stehen dabei insbesondere die Teilprozesse des Vordergrundsystems, d. h. Teilprozesse der Nutzung und Pflege des T-Shirts (vgl. Abbildung 3-2

und 4-1). Technische Details zu den Teilprozessen des Hintergrundsystems – deren Modellierung ausschließlich auf der Grundlage von Sekundärdaten erfolgte – werden in den folgenden Unterkapiteln nur allgemein beschrieben und beschränken sich im Wesentlichen auf die Angabe der verwendeten Inventardaten und Quellverweise. Gleiches gilt für die Details zu verknüpften Materialvor- und nachketten sowie den Prozessen zur Energie- und Wasserbereitstellung.

4.2.1. Herstellung der Vorprodukte (Modul A)

Die Herstellung der Vorprodukte beinhaltet drei wesentliche Teilprozesse: (1) die Herstellung des Strickgarns, (2) die Herstellung des Nähgarns und (3) die Herstellung der Textiletiketten. Der geographische Bezug der verwendeten Datensätze kann der Tabelle 4-1 entnommen werden.

Tabelle 4-1. Geographischer Bezug der Teilprozesse im Modul A (Herstellung der Vorprodukte).

Teilprozess	Geographischer Bezug*	DQ**
Baumwolleherstellung	CN, IN, US und AU ^b	[1]
Strickgarnherstellung (Ringspinnverfahren)	64% CN 23% IN 5% PK 4% ID 4% TR	[2]
Nähgarnherstellung (PES ^a)	81% CN 13% IN 2% JP 2% TR 2% TH	[2]
Textiletiketten (PES ^a)	— " —	[2]

*Geographischer Bezug entsprechend ISO 3166-1 alpha-2 code. **Datenquelle: [1] - (Jewell et al., 2017) | [2] - (PEFCR, 2015b).

^aTextiletiketten aus Polyesterfaserstoff. ^b Anteil der Baumwolle aus unterschiedlichen Anbaugebieten entsprechend Jewell et al. (2017).

Die technische Realisierung der Energie- und Wasserbereitstellung oder der Abfallbeseitigung ist von Land zu Land stark verschieden. So zeigen sich zum Beispiel bei der Strombereitstellung große Unterschiede beim Anteil der Verstromung von Kohle oder Erdgas, was wiederum großen Einfluss auf die Umweltwirkungen der entsprechenden Bereitstellungsketten hat.

Tabelle 4-2, 4-3 und 4-4 zeigen die Stoff- und Energieströme, die für die Herstellung von Strickgarn (100 % Baumwolle), Nähgarn (Polyester Filamentgarn) und Textiletiketten (Polyestergewebe) veranschlagt wurden. Die bei der Modellierung der Teilprozesse verwendeten Inventar-/Prozessdaten wurden Jewell et al. (2017) und PEFCR (2015b) entnommen.

Tabelle 4-2. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess A.01 (Herstellung von Strickgarn aus 100% Baumwolle).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Baumwolle (entkörnt), in Ballen	Sekundärdaten	2.20E-01	kg	[1]
	Kämmlinge und kurze Fasern	—"	2.74E-02	kg	[1]
	Elektrizität (Ringspinnverfahren, kardiertes Garn)	—"	1.20E+00	MJ	[2]
	Elektrizität (Ringspinnverfahren, gekämmtes Garn)	—"	1.33E+00	MJ	[2]
Output	Strickgarn (100 % Baumwolle)	—"	1.92E-01	kg	EB, [1]
	Kämmlinge und kurze Fasern	—"	2.74E-02	kg	EB, [1]
	Abfall Deponie	—"	2.87E-02	kg	EB

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: EB - Eigene Berechnung | [1] - (Jewell et al., 2017) | [2] - (PEFCR, 2015b).

Tabelle 4-3. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess A.02 (Herstellung von Nähgarn aus Polyester Filamentgarn).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Polyethyleneterephthalate (PET), Granulat	Sekundärdaten	1.00E-03	kg	[1]
	Elektrizität	—"	1.25E-02	MJ	[1]
	Wärme (Erdgas)	—"	1.30E-02	MJ	[1]
Output	Nähgarn (Polyester Filamentgarn)	—"	1.00E-03	kg	[1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: [1] - (PEFCR, 2015b).

Tabelle 4-4. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess A.03 (Herstellung der Textiletiketten (Pflege- & Produktkennzeichnung) aus Polyestergewebe).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Polyethyleneterephthalate (PET), Granulat	Sekundärdaten	8.50E-04	kg	[1]
	Elektrizität	—"	8.52E-03	MJ	[1]
	Wärme (Erdgas)	—"	1.10E-02	MJ	[1]
Output	Produktkennzeichnung	—"	2.50E-04	kg	[1]
	Pflegekennzeichnung	—"	6.00E-04	kg	[1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: [1] - (PEFCR, 2015b).

Annahmen bzgl. der mit der Herstellung der Vorprodukte in Verbindung stehenden Transportaufwände orientieren sich im Wesentlichen an den Angaben für Transporte im PEFCR für T-Shirts (PEFCR, 2017), welche in den folgenden Tabelle 4-5 bis Tabelle 4-7 zusammengefasst sind.

Tabelle 4-5. Transportmodell tA.01 (Transport Baumwolle → A.01).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Baumwolle (entkörnt), in Ballen	Sekundärdaten	2.25E-01	kg	Tab. 4-2
	Transport, Straße (LKW)	—"	6.05E+02	kgkm	[1, 2]
	Transport, Wasser (Frachter)	—"	1.73E+03	kgkm	[1, 2]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: [1] - (PEFCR, 2017) | [2] - (Jewell et al., 2017).

Tabelle 4-6. Transportmodell tA.02 (Transport Polyester → A.02).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Polyethyleneterephthalate (PET), Granulat	Sekundärdaten	1.00E-03	kg	Tab. 4-3
	Transport, Straße (LKW)	—"—	2.52E+00	kgkm	[1, 2]
	Transport, Wasser (Frachter)	—"—	4.78E+00	kgkm	[1, 2]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: [1] - (PEFCR, 2017) | [2] - (Jewell et al., 2017).

Tabelle 4-7. Transportmodell tA.03 (Transport Polyester → A.03).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Polyethyleneterephthalate (PET), Fasern	Sekundärdaten	8.50E-04	kg	Tab. 4-4
	Transport, Straße (LKW)	—"—	1.97E+00	kgkm	[1, 2]
	Transport, Wasser (Frachter)	—"—	2.20E+00	kgkm	[1, 2]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: [1] - (PEFCR, 2017) | [2] - (Jewell et al., 2017).

4.2.2. T-Shirt-Herstellung (Modul B)

Die T-Shirt-Herstellung beinhaltet vier wesentliche Teilprozesse: (1) die Herstellung eines Single Jersey, (2) Aufbereiten und Bleichen, (3) Finishing und Krumpfen, (4) Konfektionierung. Der geographische Bezug der verwendeten Datensätze kann der Tabelle 4-8 entnommen werden.

Tabelle 4-8. Geographischer Bezug der Teilprozesse im Modul B (T-Shirt-Herstellung).

Teilprozess	Geographischer Bezug*	DQ**
Jerseyherstellung (Ringstrickverfahren)	44% CN 28% IN 17 % PK 11% EU	[1, 2]
Aufbereiten und Bleichen	—"—	[1, 2]
Finishing und Krumpfen	—"—	[1, 2]
Konfektionierung	46% BD 22% CN 19 % TR 8% IN 5% MA	[1, 2]

*Geographischer Bezug entsprechend ISO 3166-1 alpha-2 code. **Datenquelle: [1] - (PEFCR, 2015b) | [2] - (Jewell et al., 2017).

Es wurde davon ausgegangen, dass die T-Shirt-Herstellung zu größeren Teilen in China (CN), Indien (IN) und Bangladesch (BD) stattfindet (Tabelle 4-8). Annahmen zum Produktionsstandort, sowie Inventardaten zu den einzelnen Teilprozessen, wurden im wesentlichen Jewell et al. (2017) und PEFCR (2015b) entnommen.

Die Stoff- und Energieströme welche bei der Modellierung der einzelnen Teilprozessen angenommen wurden zeigen die Tabellen 4-9 bis 4-13.

Tabelle 4-9. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess B.01 (Herstellung eines Single Jersey (Ringstrickverfahren)).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Strickgarn	Sekundärdaten	1.92E-01	kg	[1]
	Lubricants at refinery	—"—	3.60E-04	kg	[1]
	Elektrizität	—"—	1.95E-01	MJ	[1]
	Wärme (Erdgas)	—"—	2.84E-01	MJ	[1]
Output	Single Jersey, roh	—"—	1.89E-01	kg	AN, [1]
	Abfall, generisch Deponie	—"—	3.12E-03	kg	AN, [1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (Jewell et al., 2017).

Tabelle 4-10. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess B.02 (Aufbereiten und Bleichen des gestrickten Single Jersey).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**	
Input	Single Jersey, roh	Sekundärdaten	1.89E-01	kg	[1]	
	Essigsäure	—"—	5.14E-04	kg	[1]	
	Kalziumsilikat	—"—	1.62E-03	kg	[1]	
	Enzyme	—"—	3.16E-04	kg	[1]	
	Wasserstoffperoxid	—"—	6.25E-03	kg	[1]	
	Natriumperoxid	—"—	5.49E-03	kg	[1]	
	Natriumsulfat	—"—	1.34E-05	kg	[1]	
	Tenside	—"—	2.12E-03	kg	[1]	
	Destilliertes Wasser	—"—	1.13E+01	kg	[1]	
	Elektrizität	—"—	1.21E-01	MJ	[1]	
	Wärme (Flüssiggas - LPG)	—"—	8.52E-02	MJ	[1]	
	Wärme (Erdgas)	—"—	3.85E-01	MJ	[1]	
	Output	Single Jersey, weiß	—"—	1.85E-01	kg	[1]
		Recyceltes Prozesswasser	—"—	3.27E+00	kg	[1]
Abwasser in Abwasseraufbereitung		—"—	4.22E+00	kg	[1]	
Wasserdampf		—"—	3.82E+00	kg	[1]	
Abfall, generisch (Deponie)		—"—	1.56E-02	kg	AN, [1]	
	Emissionen ^a	—"—	#	#	Tabelle A-1	

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (Jewell et al., 2017).

^a Die Einzelemissionen sind in Tabelle A-1 im Anhang B transparent und im Detail einsehbar.

Tabelle 4-11. Stoff- und Energieströme beim Finishing-Prozess. Submodul im Teilprozess B.03 (Finishing und Krumpfen).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Single Jersey, weiß	Sekundärdaten	1.85E-01	kg	[1]
	Essigsäure	—"—	5.72E-05	kg	[1]
	Silber (antimikrobielles Mittel)	—"—	5.86E-05	kg	[1]
	Weichmacher	—"—	2.03E-02	kg	[1]
	Schmutzabweiser (soil repellent)	—"—	4.89E-04	kg	[1]
	Wasserabweiser (water resist)	—"—	4.80E-03	kg	[1]
	Knitterschutz (wrinkle resist)	—"—	6.30E-04	kg	[1]
	Wasser, destilliert	—"—	3.01E+00	kg	[1]
	Wasserdampf	—"—	1.06E-01	kg	[1]
	Elektrizität	—"—	2.77E-01	MJ	[1]
	Wärme (Steinkohle)	—"—	3.51E-01	MJ	[1]
	Wärme (Heizöl, schwer)	—"—	1.41E-04	MJ	[1]
	Wärme (Flüssiggas - LPG)	—"—	4.71E-01	MJ	[1]
	Wärme (Erdgas)	—"—	2.03E+00	MJ	[1]
	Output	Single Jersey, aufbereitet	—"—	1.84E-01	kg
Recyceltes Prozesswasser		—"—	1.85E-01	kg	[1]
Abwasser in Abwasseraufbereitung		—"—	1.87E+00	kg	[1]
Wasserdampf		—"—	1.07E+00	kg	[1]
Abfall, generisch Deponie		—"—	1.76E-02	kg	AN, [1]
Emissionen ^a		—"—	#	#	Tabelle A-2

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (Jewell et al., 2017).

^a Die Einzelemissionen sind in Tabelle A-2 im Anhang B transparent und im Detail einsehbar.

Tabelle 4-12. Stoff- und Energieströme beim Prozess des Krumpfens. Submodul im Teilprozess B.03 (Finishing und Krumpfen).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Single Jersey, aufbereitet	Sekundärdaten	1.84E-01	kg	[1]
	Prozesswasser	—"—	5.02E-03	kg	[1]
	Elektrizität	—"—	3.41E-02	MJ	[1]
	Wärme (generisch)	—"—	1.75E-04	MJ	[1]
	Wärme (Flüssiggas - LPG)	—"—	1.04E-01	MJ	[1]
	Wärme (Erdgas)	—"—	1.21E-01	MJ	[1]
	Output	Single Jersey, final	—"—	1.83E-01	kg
Wasserdampf		—"—	5.02E-03	kg	[1]
Abfall, generisch Deponie		—"—	7.79E-04	kg	AN, [1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (Jewell et al., 2017).

Tabelle 4-13. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess B.04 (Konfektionierung).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Single Jersey, gekrumpft	Sekundärdaten	1.83E-01	kg	[1]
	Polyester Filamentgarn	—" —	1.00E-03	kg	[1]
	Produktkennzeichnung	—" —	2.50E-04	kg	[1]
	Pflegekennzeichnung	—" —	6.00E-04	kg	[1]
	Elektrizität (Konfektionierung)	—" —	5.84E-02	MJ	[1]
Output	T-Shirt (100% Baumwolle)	—" —	1.56E-01	kg	[1]
	Abfall, generisch Deponie	—" —	2.91E-02	kg	AN, [1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (Jewell et al., 2017).

Die für die Verknüpfung der Teilprozesse erforderlichen Transportschritte sind in den Tabellen 4-14 bis 4-18. Informationen zu Transportmitteln und zurückgelegten Distanzen, etwa beim Transport des Nähgarns vom Teilprozess A.02 zum Teilprozess B.04. (Konfektionierung), entstammen größtenteils der PEFCR für T-Shirts (PEFCR, 2017) und Jewell et al. (2017).

Tabelle 4-14. Transportmodell tB.01 (Transport Strickgarn → B.01).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Strickgarn	Sekundärdaten	1.92E-01	kg	Tab. 4-2
	Transport, Straße (LKW)	—" —	4.46E+02	kgkm	AN, [1, 2]
	Transport, Wasser (Frachter)	—" —	1.31E+03	kgkm	AN, [1, 2]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (Jewell et al., 2017) | [2] - (PEFCR, 2017).

Tabelle 4-15. Transportmodell tB.02 (Transport Single Jersey, roh → B.02).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Single Jersey, roh	Sekundärdaten	1.89E-01	kg	Tab. 4-9
	Transport, Straße (LKW)	—" —	2.83E+02	kgkm	AN, [1, 2]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (Jewell et al., 2017) | [2] - (PEFCR, 2017).

Tabelle 4-16. Transportmodell tB.03 (Transport Single Jersey, final → B.04).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Single Jersey, final	Sekundärdaten	1.83E-01	kg	Tab. 4-3
	Transport, Straße (LKW)	—" —	3.17E+02	kgkm	AN, [1]
	Transport, Wasser (Frachter)	—" —	1.09E+03	kgkm	AN, [1]
	Transport, Luft (Flugzeug)	—" —	7.16E+01	kgkm	AN, [1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (PEFCR, 2017).

Tabelle 4-17. Transportmodell tB.04 (Transport Nähgarn → B.04).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Polyester Filamentgarn	Sekundärdaten	1.00E-03	kg	Tab. 4-2
	Transport, Straße (LKW)	—"—	2.33E+00	kgkm	AN, [1, 2]
	Transport, Wasser (Frachter)	—"—	6.85E+00	kgkm	AN, [1, 2]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (Jewell et al., 2017) | [2] - (PEFCR, 2017).

Tabelle 4-18. Transportmodell tB.04 (Transport Produkt- & Pflegekennzeichnung → B.04).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Produktkennzeichnung	Sekundärdaten	2.50E-04	kg	Tab. 4-4
	Pflegekennzeichnung	—"—	6.00E-04	kg	Tab. 4-4
	Transport, Straße (LKW)	—"—	1.94E+00	kgkm	AN, [1, 2]
	Transport, Wasser (Frachter)	—"—	5.73E+00	kgkm	AN, [1, 2]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (Jewell et al., 2017) | [2] - (PEFCR, 2017).

4.2.3. Handel und Vertrieb des T-Shirts (Modul C)

Der Handel und Vertrieb des finalen Produkts beinhaltet zwei wesentliche Teilprozesse: (1) die Verpackung und (2) die Lagerung und Distribution. Da die Nutzung und Pflege des T-Shirts in Deutschland stattfindet, wurde bei den Elektrizität- und Wasserbereitstellungsprozessen in den Vertriebsmodulen von internationalen, bzw. europäischen Durchschnittsniveaus ausgegangen (Tabelle 4-19). Die bei der Modellierung der Teilprozesse verwendeten Daten entstammen vorrangig der Screening-Studie zur T-Shirt PEFCR (PEFCR, 2015b).

Tabelle 4-19. Geographischer Bezug der Teilprozesse im Modul C (Handel und Vertrieb des T-Shirts).

Teilprozess	Geographischer Bezug*	DQ**
Verpackung	GLO ^a	AN, [1]
Lagerung und Distribution	GLO ^a und EU-28	AN, [1]

*Geographischer Bezug entsprechend ISO 3166-1 alpha-2 code. **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (PEFCR, 2015b).

^a Annahme eines internationalen Durchschnitts.

Die Tabelle 4-20 und 4-21 zeigen die Stoff- und Energieströme, die für die Teilprozesse im Prozessmodul C (Handel und Vertrieb des finalen Produkts) veranschlagt wurden.

Tabelle 4-20. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess C.01 (Verpackung).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	T-Shirt (100 % Baumwolle)	generisch	1.56E-01	kg	Tab. 4-13
	Distributionszentrum (Ort des Verpackens)	—"—	5.47E-08	St ^a	AN
	Plastikfolie (Schutzhülle)	—"—	1.00E-02	kg	[1]
	Kraftliner & Papier (Preis-/Markenschild)	—"—	3.65E-03	kg	[1]
	Kraftliner & Papier (Kartonhülle)	—"—	4.33E-02	kg	[1]
Output	T-Shirt (100 % Baumwolle), verpackt	—"—	1.56E-01	kg	[1]
	Verpackung (Σ Verpackungsmaterialien)	—"—	5.70E-02	kg	[1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (PEFCR, 2015b).

^a Stück.

Tabelle 4-21. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess C.02 (Lagerung und Distribution).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	T-Shirt (100 % Baumwolle), verpackt	Sekundärdaten	1.56E-01	kg	Tab. 4-20
	Distributionszentrum (Lagerung)	—"—	5.47E-10	St ^a	AN
	Verkaufsmenge	—"—	1.56E-01	kg	[1]
Output	T-Shirt (100 % Baumwolle), gehandelt	—"—	1.56E-01	kg	[1]
	Verpackung (Σ Verpackungsmaterialien)	—"—	5.70E-02	kg	[1]

*Menge pro funktioneller Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (PEFCR, 2015b).

^aStück.

Die dem Modul C zugeordneten Transportaufwände, welche im Wesentlichen den Import aus Asien abbilden, sind in Tabelle 4-22 zusammengefasst.

Tabelle 4-22. Transportmodell tC.01 (Transport T-Shirt → C.01).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	T-Shirt (100 % Baumwolle)	Sekundärdaten	1.56E-01	kg	Tab. 4-13
	Transport, Straße (LKW)	—"—	2.40E+02	kgkm	AN, [1]
	Transport, Wasser (Frachter)	—"—	8.61E+02	kgkm	AN, [1]
	Transport, Luft (Flugzeug)	—"—	1.25E+02	kgkm	AN, [1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (PEFCR, 2017).

Die eingesetzten Transportmittel und zurückgelegten Distanzen repräsentieren den europäischen Durchschnitt für Textilimporte, entsprechend den in der PEFCR für T-Shirts aufgeführten Berechnungen. Die mit dem Onlineversand (OV) verbundenen Transportschritte, sowie die Einkaufswege der T-Shirt-Konsumenten sind dem Modul D (Nutzung und Pflege des T-Shirts) zugeordnet (siehe Kapitel 4.2.4).

4.2.4. Nutzung und Pflege des T-Shirts (Modul D)

Die regelmäßige Pflege des Produkts sichert einen andauernden Nutzen. Bei der Wäschepflege wurde versucht, das Verhalten deutscher Durchschnittshaushalte im Jahr 2018 abzubilden. Die Modellierung der Wäschepflege erforderte Annahmen in Bezug auf die Art, Form und Dosierung der verwendeten Waschmittel, die genutzte Waschmaschine und das gewählte Programm, als auch die Art und Weise der Wäschetrocknung. Der geographische Bezug der dem Modul D zugehörigen Teilprozesse findet sich in Tabelle 4-23.

Tabelle 4-23. Geographischer Bezug der Teilprozesse im Modul D (Nutzung und Pflege des T-Shirts).

Teilprozess	Geographischer Bezug*	DQ**
Herstellung Waschmittel	EU-28	ED, [1, 2]
Herstellung Waschmaschine	GLO ^b	AN, [3, 4]
Herstellung Trockner	GLO ^b	AN, [3, 4]
Wäschepflege	DE	AN, [5]
Trocknen	DE	AN, [2]
EoL – Verpackungsmaterialien ^b	DE	AN
EoL – Haushaltsgeräte ^c	DE	AN

*Geographischer Bezug entsprechend ISO 3166-1 alpha-2 code. **Datenquelle: ED – Erhobene Daten (Primärdaten) | AN - Annahme entsprechend Ziel- und Untersuchungsrahmen (siehe auch Kapitel 2.1 und 3.3) | 1 - (PEFCR, 2015b) | [2] - (PEFCR, 2017) | [3] - (Yuan et al., 2016) | [4] - (Yamaguchi et al., 2011) | [5] - (StiWa, 2017).

^bEnd-of-life Modell (d. h. Verwertungsmodell) für Verpackungsmaterialien. ^cEnd-of-life Modell (d. h. Verwertungsmodell) für Haushaltsgeräte (Annahme betrifft Waschmaschine und Trockner).

Zur hygienisch einwandfreien Reinigung des T-Shirts wurde die Nutzung eines generischen Flüssigwaschmittels mit einer Standarddosierung^a von 55 ml angenommen. Bei dem verwendeten Waschmittel handelt es sich um eine Bezugsrezeptur, die durch ihre Kombination aus Eigenschaften von Voll-/Universal- bzw. Bunt-/Color-Flüssigwaschmitteln den Markt an flüssigem Waschmittel in Deutschland abdeckt, aber so nicht vermarktet wird. Voll-/Universal-Flüssigwaschmittel enthalten bspw. i. d. R. optische Aufheller, die in Bunt-/Color-Flüssigwaschmitteln nicht zu finden sind. Umgekehrt enthalten bspw. Bunt-/Color-Flüssigwaschmittel i. d. R. Farbübertragungsinhibitoren, welche wiederum nicht in Voll-/Universal-Flüssigwaschmitteln anzutreffen sind.

Daten zur Rezeptur des repräsentativen Flüssigwaschmittels wurden von Mitgliedsfirmen des IKW bereitgestellt. Die verwendete Rezeptur ist in der Tabelle 4-24 aufgeführt. Die bei der Modellierung der Inhaltsstoffe verwendeten Vor- und Nachketten (Hintergrundsysteme) finden sich im Anhang B in der Tabelle A-4.

^a Empfohlene Dosierung für eine Waschmaschinenfüllung von 4,5 Kilogramm bei einem Wasserhärtegrad „mittel“ gemäß Abschnitt B des Anhangs VII der Detergenzienverordnung (EG) Nr. 648/2004.

Tabelle 4-24. Rezeptur eines repräsentativen Flüssigwaschmittels. Submodul im Teilprozess D.01 (Herstellung Waschmittel).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Citronensäure	Primärdaten	3.33E-03	kg	ED
	Natriumcitrat	—" —	2.14E-02	kg	—" —
	Amylasen	—" —	7.68E-04	kg	—" —
	Cellulase	—" —	3.83E-04	kg	—" —
	Mannanase	—" —	1.19E-04	kg	—" —
	Lipase	—" —	3.30E-04	kg	—" —
	Pektinasen	—" —	1.37E-04	kg	—" —
	Protease	—" —	2.05E-03	kg	—" —
	Salze der Borsäure ^a	—" —	5.84E-03	kg	—" —
	Na-Formiat	—" —	2.64E-04	kg	—" —
	Ethanol	—" —	1.67E-02	kg	—" —
	Farbmittel ^b	—" —	1.42E-03	kg	—" —
	Optische Aufheller ^c	—" —	7.24E-04	kg	—" —
	Parfümöle/Duftstoffe ^d	—" —	5.85E-03	kg	—" —
	Phosphonate	—" —	6.98E-03	kg	—" —
	Polycarboxylate (Cobuilder, Polymer)	—" —	1.17E-02	kg	—" —
	Silikone	—" —	1.19E-05	kg	—" —
	Anionische Tenside (FAES) ^e	—" —	3.96E-02	kg	—" —
	Anionische Tenside (LAS) ^f	—" —	9.41E-02	kg	—" —
	Seife	—" —	1.77E-02	kg	—" —
	Nichtionische Tenside (FAEO) ^g	—" —	8.74E-02	kg	—" —
	Glyzerine (Lösungsmittel)	—" —	1.79E-02	kg	—" —
	Propylenglykol (Lösungsmittel)	—" —	3.26E-02	kg	—" —
	Konservierungsstoffe	—" —	3.88E-05	kg	—" —
	Styrene/Acrylates Copolymer	—" —	5.54E-04	kg	—" —
	Natriumchlorid	—" —	1.19E-05	kg	—" —
	Sodium Cumenesulfonate	—" —	2.18E-03	kg	—" —
	Wasser, destilliert	—" —	6.30E-01	l	—" —
Output	∑ Zutaten Flüssigwaschmittel	—" —	1.00E+00	kg	—" —

*Menge pro 1 kg Flüssigwaschmittel (Dichte: 1.02 g/ ml). **Datenquelle: ED – Erhobene Daten.

^a und andere Borverbindungen. ^b Farbstoffe und Pigmente. ^c fluoreszierende Weißmacher. ^d einschließlich Lösungsmittel und Beistoffe. ^e Anionische Tenside als Fettalkoholethersulfate (FAES). ^f Anionische Tenside als Dodecylbenzolsulfonate (LAS). ^g Nichtionische Tenside als Fettalkoholethoxylat (FAEO) auch Laurylaminoxid.

Bei der Waschmittelbereitstellung wird, neben der Bereitstellung der Waschmittelinhaltsstoffe, auch die Waschmittelkonfektionierung (Formulierung, Mischen und Abpacken) sowie die Bereitstellung der Verpackungsmaterialien mit einbezogen. Für die Energie- und Wasserbereitstellungsprozess in der Waschmittelkonfektionierung wurde von einem europäischen Durchschnitt ausgegangen (Tabelle 4-23). Datengrundlage hierfür waren vor allem die Arbeitspapiere zur PEFCR für Vollwaschmittel (PEFCR, 2015a), sowie Angaben von Mitgliedern des Begleitkreises.

D.01 | Herstellung Flüssigwaschmittel (Jan 2019)
 Process plan: Mass [kg]

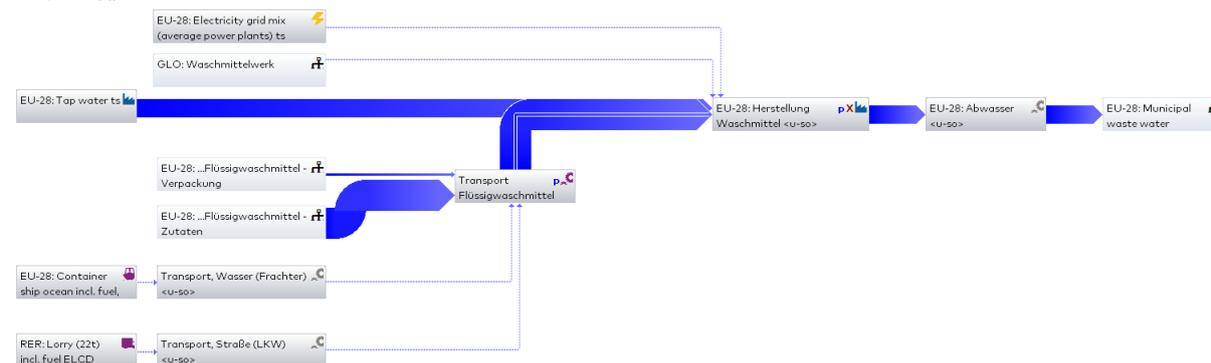


Abbildung 4-2. Herstellung von Flüssigwaschmittel – Modellierung in GaBi 8.7.

Abbildung 4-2 zeigt das Prozessbild für den Teilprozess der Waschmittelherstellung. Daten zur Formulierung eines repräsentativen Flüssigwaschmittels, zur Verpackung und zum Transport des fertigen Endprodukts zum Verbraucher sind in der Tabelle 4-25 aufgeführt.

Tabelle 4-25. Formulierung eines repräsentativen Flüssigwaschmittels, Verpackung, und Transport des fertigen Endprodukts zum Verbraucher. Submodul im Teilprozess D.01 (Herstellung Waschmittel).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	∑ Zutaten Flüssigwaschmittel	Primärdaten	1.00E+00	kg	Tab. 4-24
	Prozesswasser	Sekundärdaten	6.00E-01	l	[1]
	Waschmittelwerk	—"	4.00E-10	St ^d	[1]
	Elektrizität	—"	5.71E-01	MJ	[1]
	Verpackung – Kraftliner & Papier (Karton)	—"	5.97E-02	kg	[1]
	Verpackung – HDPE ^a (Flasche & Dose)	—"	4.84E-02	kg	[1]
	Verpackung – PP ^b (Deckel & Dosierkappe)	—"	1.05E-02	kg	[1]
	Verpackung – LDPE ^c (Folie & Tüten)	—"	4.04E-03	kg	[1]
	Verpackung – Holz (EURO Palette)	—"	1.83E-03	kg	[1]
	Transport, Wasser (Frachter)	—"	8.00E+03	kgkm	[1]
	Transport, Straße (LKW)	—"	8.79E+01	kgkm	[1]
	Transport, Straße (Verkehrsbuss)	—"	3.53E-02	person. km	[1]
	Transport, Straße (Lieferwagen)	—"	2.45E-03	person. km	[1]
	Transport, Straße (Personen-Kfz)	—"	1.88E-01	person. km	[1]
Output	Flüssigwaschmittel, beim Verbraucher	—"	1.00E+00	kg	EB
	Verpackung (∑ Verpackungsmaterialien)	—"	1.24E-01	kg	EB
	Abwasser (100 % in die Aufbereitung)	—"	6.00E-01	l	AN, EB

*Menge pro 1 kg Flüssigwaschmittel (Dichte: 1.02 g/ ml). **Datenquelle: AN- Annahme | EB – Eigene Berechnung | [1] - (PEFCR, 2015a).

^a High Density Polyethylen. ^b Polypropylen. ^c Low Density Polyethylen. ^d Stück.

Die Prozess- und Inventardaten (Materialzusammensetzung und Montage), die für die Modellierung einer konventionellen Waschmaschine verwendet wurden, entstammen einer Ökobilanzstudie von Yamaguchi et al. (2011). Die für die Waschmaschine veranschlagten Stoff-/ Energieströme sind in Tabelle 4-26 und Tabelle 4-27 zusammengefasst.

Tabelle 4-26. Materialzusammensetzung einer konventionellen Waschmaschine. Submodul im Teilprozess D.02 (Herstellung Waschmaschine).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Kohlenstoffstahl, feuerverzinkt	Sekundärdaten	2.67E+01	kg	[1]
	Edelstahlblech	—"	4.20E+00	kg	[1]
	Aluminiumblech	—"	7.69E+00	kg	[1]
	Kupferblech	—"	2.42E+00	kg	[1]
	Polypropylen (PP)	—"	1.89E+01	kg	[1]
	Polystyrol (PS)	—"	1.00E-01	kg	[1]
	Polyvinylidenchlorid (PVC)	—"	7.20E-01	kg	[1]
	Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	—"	1.60E+00	kg	[1]
	Acryl, antistatisch (AS)	—"	1.00E-01	kg	[1]
	Polyethylenterephthalat (PET)	—"	3.71E+00	kg	[1]
	Plastik, unspezifisch	—"	4.20E-01	kg	[1]
	Gummi (kg)	—"	1.18E+00	kg	[1]
	Glas (kg)	—"	1.00E-01	kg	[1]
	Elektronikkomponenten, unspezifisch	—"	1.40E-01	kg	[1]
Output	∑ Materialien Waschmaschine	—"	6.80E+01	kg	[1]

*Menge pro konventioneller Waschmaschine (Gewicht: 68 kg | Max. Ladekapazität: 7.5 kg). **Datenquelle: [1] - (Yamaguchi et al., 2011).

Tabelle 4-27. Montage und Verpackung einer konventionellen Waschmaschine. Submodul im Teilprozess D.02 (Herstellung Waschmaschine).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	∑ Materialien Waschmaschine	Sekundärdaten	6.80E+01	kg	Tab. 4-26
	Prozesswasser	—"	1.04E+01	kg	[1]
	Wasserdampf	—"	1.24E+00	kg	[1]
	Heizöl, schwer	—"	4.17E-01	kg	[1]
	Elektrizität	—"	4.39E+02	MJ	[1]
	Verpackung – Kraftliner und Papier (Karton)	—"	1.31E+00	kg	[1]
	Verpackung – Nylon	—"	9.07E-02	kg	[1]
	Verpackung - Polyethylen (PE)	—"	1.81E-01	kg	[1]
	Verpackung – Polystyrol (PS)	—"	4.53E-01	kg	[1]
	Output	Waschmaschine	—"	1.00E+00	St ^a
Verpackung (∑ Verpackungsmaterialien)		—"	2.04E+00	kg	[1]
Wasserdampf		—"	1.24E+00	kg	[2]
Abwasser		—"	1.04E+01	l	[2]

Menge pro konventioneller Waschmaschine (Gewicht: 68 kg | Max. Ladekapazität: 7.5 kg). **Datenquelle: [1] - (Yuan et al., 2016) | [2] - (Yamaguchi et al., 2011).

^aStück.

Für die Modellierung der Materialzusammensetzung und Montage eines konventionellen Trockners wurden die für die Waschmaschine verwendeten Inventardaten auf einen 49 kg wiegenden Trockner heruntergerechnet. Diese Approximation ist zu rechtfertigen, da die Herstellung der Waschmaschine und des Trockners zu den Umweltwirkungen der Wäschepflege einen vernachlässigbaren Beitrag leisten (vgl. Kapitel 5.1). Die für die Herstellung und Montage des Trockners veranschlagten Stoff-/ Energieströme sind in Tabelle 4-28 und Tabelle 4-29 aufgeführt.

Tabelle 4-28. Annahmen zur Materialzusammensetzung eines konventionellen Trockners. Submodul im Teilprozess D.03 (Herstellung Trockner).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Kohlenstoffstahl, feuerverzinkt	Sekundärdaten	1.93E+01	kg	AN, [1]
	Edelstahlblech	—"	3.03E+00	kg	AN, [1]
	Aluminiumblech	—"	5.54E+00	kg	AN, [1]
	Kupferblech	—"	1.74E+00	kg	AN, [1]
	Polypropylen (PP)	—"	1.36E+01	kg	AN, [1]
	Polystyrol (PS)	—"	7.21E-02	kg	AN, [1]
	Polyvinylidenchlorid (PVC)	—"	5.19E-01	kg	AN, [1]
	Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	—"	1.15E+00	kg	AN, [1]
	Acryl, antistatisch (AS)	—"	7.21E-02	kg	AN, [1]
	Polyethylenterephthalat (PET)	—"	2.67E+00	kg	AN, [1]
	Plastic, unspezifisch	—"	3.03E-01	kg	AN, [1]
	Rubber (kg)	—"	8.53E-01	kg	AN, [1]
	Glass (kg)	—"	7.21E-02	kg	AN, [1]
	Elektronikkomponenten, unspezifisch	—"	1.01E-01	kg	AN, [1]
Output	∑ Materialien Trockner	—"	4.90E+01	kg	AN, [1]

*Menge pro konventionellen Trockner (Gewicht: 49 kg | Max. Ladekapazität: 4.425 kg). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (Yamaguchi et al., 2011).

Tabelle 4-29. Annahmen zur Montage und Verpackung eines konventionellen Trockners. Submodul im Teilprozess D.03 (Herstellung Trockner).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	∑ Materialien Trockner	Sekundärdaten	4.9E+01	kg	Tab. 4-28
	Prozesswasser	—"	7.51E+00	kg	AN, [1]
	Wasserdampf	—"	8.95E-01	kg	AN, [1]
	Heizöl, schwer	—"	3.01E-01	kg	AN, [1]
	Elektrizität	—"	3.16E+02	MJ	AN, [1]
	Verpackung – Kraftliner & Papier (Karton)	—"	9.47E-01	kg	AN, [1]
	Verpackung – Nylon	—"	6.53E-02	kg	AN, [1]
	Verpackung - Polyethylen (PE)	—"	1.31E-01	kg	AN, [1]
	Verpackung – Polystyrol (PS)	—"	3.27E-01	kg	AN, [1]
	Output	Trockner	—"	1.00E+00	St ^a
Verpackung (∑ Verpackungsmaterialien)		—"	1.47E+00	kg	AN, [1]
Wasserdampf		—"	8.95E-01	kg	AN, [2]
Abwasser		—"	7.51E+00	l	AN, [2]

*Menge pro konventionellen Trockner (Gewicht: 49 kg | Max. Ladekapazität: 4.425 kg). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (Yamaguchi et al., 2011) | [2] - (Yuan et al., 2016).

^aStück.

Der durchschnittliche Stromverbrauch von Waschmaschinen wurde aus Daten abgeleitet, die aus durchgeführten Untersuchungen der Stiftung Warentest (StiWa) vorlagen (StiWa, 2017). Zur Abschätzung des Strom- und Wasserverbrauchs von Waschmaschinen wurde zunächst das Mittel der in StiWa (2017) getesteten Modelle für die Waschprogrammeinstellungen (1) 30°C – Pflegeleicht, (2) 40°C – Pflegeleicht und (3) 60°C – Pflegeleicht gebildet (Tabelle 4-30).

Als Ausgangslage, bzw. Vergleichsvariante wurde das Waschen bei einer Temperatur von 43.3°C angenommen (Temperaturmittel der betrachteten Waschprogrammeinstellungen). Die

für die Ausgangslage angenommenen Verbrauchswerte für Strom und Wasser entsprechen den gemittelten Durchschnittsverbräuchen in den drei Waschprogrammeinstellungen (Tabelle 4-30).

Tabelle 4-30. Annahmen zum Wäschepflegetechnik entsprechend StiWa (2017).

Merkmal	Waschmaschinenmodell*														Ø	s**
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M			
Max. Beladung (kg)	8.0	7.0	8.0	6.0	6.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	6.0	6.0	7.3	0.9	
Max. Temperatur bei 60 °C ^a	63.0	64.0	60.0	61.0	62.0	60.0	63.0	64.0	62.0	56.0	66.0	62.0	63.0	62.0	2.4	
Füllmenge Pflegeleicht ^b	4.0	3.5	4.0	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	3.0	4.0	2.5	3.0	3.5	0.6	
30 °C - Pflegeleicht																
Beladung	4.0	3.5	4.0	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	3.0	4.0	2.5	3.0	3.5	0.6	
Wasserverbrauch (l)	50.0	42.0	48.0	58.0	65.0	43.0	55.0	52.0	56.0	44.0	59.0	42.0	61.0	51.9	7.8	
Stromverbrauch (kWh)	0.5	0.3	0.5	0.5	0.4	0.3	0.4	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.1	
Dauer (Std)	2.0	1.6	2.0	2.0	1.4	1.6	2.4	2.2	2.3	2.4	1.3	1.3	1.2	1.8	0.4	
40 °C - Bunt, halbe Beladung (≙ Pflegeleicht)																
Beladung	4.0	3.5	4.0	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	3.0	4.0	2.5	3.0	3.5	0.6	
Wasserverbrauch (l)	52.0	47.0	51.0	53.0	33.0	58.0	59.0	49.0	50.0	55.0	53.0	63.0	26.0	49.9	10.2	
Stromverbrauch (kWh)	0.8	0.6	0.8	0.8	0.3	0.7	0.4	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.6	0.2	
Dauer (Std)	3.0	2.3	3.0	3.0	1.5	2.4	2.0	2.4	2.1	2.2	1.5	1.5	2.5	2.2	0.6	
60 °C - Bunt, Normal, halbe Beladung (≙ Pflegeleicht)																
Beladung	4.0	3.5	4.0	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	3.0	4.0	2.5	3.0	3.5	0.6	
Wasserverbrauch (l)	52.0	47.0	51.0	53.0	34.0	58.0	59.0	52.0	60.0	42.0	63.0	64.0	45.0	52.3	8.7	
Stromverbrauch (kWh)	1.1	1.0	1.1	1.2	0.8	1.1	1.2	1.2	1.3	0.8	1.2	1.1	0.9	1.1	0.2	
Dauer (Std)	2.6	2.3	2.6	3.0	1.5	2.5	2.3	2.4	2.6	1.6	1.6	2.1	1.5	2.2	0.5	
Ø 43.3 °C - Bunt, Normal, halbe Beladung (≙ Pflegeleicht)																
Beladung	4.0	3.5	4.0	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	3.0	4.0	2.5	3.0	3.5	0.6	
Wasserverbrauch (l)	51.3	45.3	50.0	54.7	44.0	53.0	57.7	51.0	55.3	47.0	58.3	56.3	44.0	51.4	5.1	
Stromverbrauch (kWh)	0.8	0.6	0.8	0.8	0.5	0.7	0.6	0.8	0.8	0.6	0.8	0.6	0.6	0.7	0.1	
Dauer (Std)	2.5	2.0	2.5	2.7	1.4	2.1	2.2	2.3	2.3	2.0	1.4	1.6	1.7	2.1	0.4	

*Modell: A - Bosch WAW28570 | B - Miele WDB030 WPS Eco | C - Siemens WM14W490 | D - Siemens WM14N190 | E - Constructa CWF14N00 | F - Samsung WW8GK6400W | G - AEG L8FE74485 | H - Grundig GWA 38431 | I - LG F14WM8CN1 | J - Bauknecht WA Plus 8614 | K - Panasonic NA-148XRW | L - Beko WML 61433 | M - Amica WA14662W. **Standartabweichung (+/-).

^a gemessen im Normalprogramm. ^b entspricht der Hälfte der Maximalbeladung.

Ausgehend von der Untersuchung der StiWa (2017) wurde im Teilprozess Waschen von einer durchschnittlichen Beladung der Waschmaschine von 3.5 kg ausgegangen (Tabelle 4-31). Diese Füllmenge liegt deutlich unterhalb der in der Detergenzienverordnung (EG) Nr. 648/2004 als „normal“ definierten Waschmaschinenfüllung (4.5 Kilogramm), spiegelt aber recht treffend die gelebte Praktik in deutschen Haushalten wider (Kruschwitz et al., 2014). Der beim Waschen verursachte Verschleiß der Waschmaschine (und des Trockners) wurde – den Angaben in StiWa (2017) entsprechend – auf der Grundlage einer Lebensdauer von 1840 Wäschen (etwa 10 Jahren) berechnet (Tabelle 4-31).

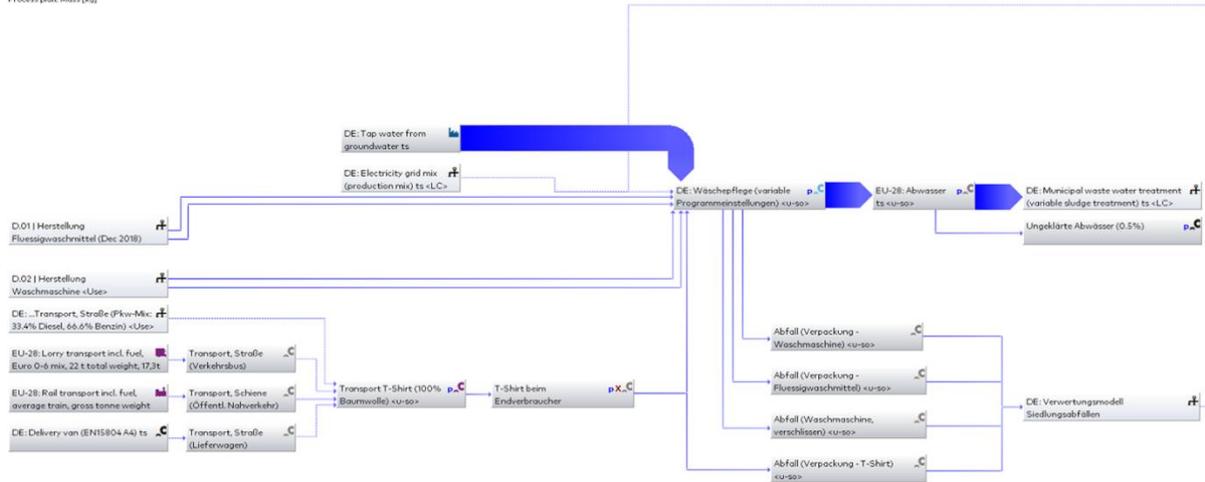


Abbildung 4-3. Teilprozess Wäschepflege (Waschen) – Modellierung in GaBi 8.7.

Abbildung 4-3 zeigt das Prozessbild für den in GaBi 8.7 modellierten Waschprozess. Die für die Teilprozesse Wäschepflege (bei \varnothing 43 °C) und Maschinentrocknung angenommenen Stoff- und Energieströme finden sich in Tabelle 4-31 und Tabelle 4-32.

Tabelle 4-31. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess D.04 (Wäschepflege \varnothing 43 °C).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	T-Shirt (100 % Baumwolle)	Sekundärdaten	3.54E+00	kg	[1], Tab. 4-22
	Waschmaschine	—"	3.70E-02	kg	[1], Tab. 4-27
	Flüssigwaschmittel	Primärdaten	5.61E-02	kg	AN, Tab. 4-25
	Wasser	Sekundärdaten	5.14E+01	kg	[1]
	Elektrizität	—"	2.54E+00	MJ	[1]
	Verpackung - Flüssigwaschmittel ^a	—"	6.98E-03	kg	AN, Tab. 4-25
	Verpackung - Waschmaschine ^b	—"	1.11E-03	kg	AN, Tab. 4-27
	Verpackung - T-Shirt ^c	—"	2.94E-02	kg	AN, Tab. 4-22
Output	T-Shirt (100 % Baumwolle), gewaschen ^d	—"	4.43E+00	St ^e	AN, [1]
	Abwasser (99.5 % in die Aufbereitung)	—"	4.80E+01	l	AN, [1]
	Abwasser (0.5 % in Frischwasser)	—"	2.53E+00	l	AN, [1]
	Verpackung - Flüssigwaschmittel (Abfall)	—"	6.98E-03	kg	AN, Tab. 4-25
	Verpackung - Waschmaschine (Abfall)	—"	1.11E-03	kg	AN, Tab. 4-27
	Verpackung - T-Shirt (Abfall)	—"	2.94E-02	kg	AN, Tab. 4-22
	Waschmaschine, verschlissen	—"	3.70E-02	kg	AN

*Menge pro Waschgang (Temperatur: \varnothing 43 °C, Maschinenbeladung: 3.54 kg | Max. Ladekapazität: 7.5 kg).

**Datenquelle: AN - Annahme | [1] - (StiWa, 2017).

^a Anteilig berechnet bezogen auf eine Verpackung für 1000 ml Flüssigwaschmittel. ^b Anteilig berechnet bezogen auf eine Lebensdauer von 10 Jahren (1840 Wäschen). ^c Anteilig berechnet bezogen auf 22.7 T-Shirts (3.54 kg) mit einer Lebensdauer von 44 Wäschen. ^d Nässe der gewaschenen Wäsche führt zu 25% Mehrgewicht (Annahme basierend auf Angaben in Yamaguchi et al. (2011)). ^e Stück.

Bei der Modellierung des Waschprozesses wurde davon ausgegangen, dass die Beladung der Maschine ausschließlich aus weißen T-Shirts besteht (22.71 Stück). Für das 44-malige Waschen eines weißen T-Shirts werden demzufolge Verbrauchswerte im Äquivalent von 1.94 Waschprozessen bei einer durchschnittlichen Maschinenbeladung von 3.54 kg Wäsche angenommen. Die gewaschenen T-Shirts (Output des Waschprozesses) gehen im

Gesamtszenario anteilig (10 %) als Input in den Teilprozess Maschinentrocknung. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Restfeuchte in den gewaschenen und geschleuderten T-Shirts ein Mehrgewicht von ca. 25 % verursacht. Die für die maschinelle Trocknung einer ganzen Waschmaschinenbeladung (d. h. 100% der 4.43E+00 kg gewaschenen und geschleuderten T-Shirts werden maschinell getrocknet) veranschlagten Stoff- und Energieströme können der Tabelle 4-32 entnommen werden (vgl. Output in Tabelle 4-31). Bei einem Anteil der maschinellen Trocknung von 10%, werden einem 44-mal gewaschenen T-Shirt Verbrauchswerte in Höhe von 0.19 Trocknungsladungen zugeschrieben.

Tabelle 4-32. Modellierete Stoff- und Energieströme im Teilprozess D.05 (Maschinentrocknung).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	T-Shirt (100 % Baumwolle), gewaschen	Sekundärdaten	4.43E+00	kg	[1], Tab. 4-30
	Trockner	—"–	1.96E-02	kg	[2], Tab. 4-29
	Elektrizität	—"–	5.34E+00	MJ	[1]
	Verpackung – Trockner ^a	—"–	5.89E-04	kg	AN, Tab. 4-29
Output	T-Shirt (100 % Baumwolle), getrocknet	—"–	3.54E+00	kg	AN
	Wasserdampf	—"–	8.41E-01	kg	AN
	Abwasser (99,5 % in die Aufbereitung)	—"–	4.20E-02	kg	AN
	Abwasser (0,5 % in Frischwasser)	—"–	2.21E-03	kg	AN
	Verpackung – Trockner (Abfall)	—"–	5.89E-04	kg	AN, Tab. 4-29
	Trockner, verschlissen	—"–	1.96E-02	kg	AN

*Menge pro maschineller Trocknung einer durchschnittlichen Waschmaschinenladung (Maschinenbeladung: 4.425 kg | Max. Ladekapazität: 6 kg). **Datenquelle: AN - Annahme | [1] - (PEFCR, 2017) | [2] - (StiWa, 2017).

^a Anteilig berechnet bezogen auf eine Lebensdauer von 10 Jahren (1840 Durchläufe).

Annahmen zum Anteil der maschinellen Trocknung wurden – mangels verfügbarer Daten für Deutschland – der PEFCR für T-Shirts (PEFCR 2017) entnommen. Entsprechend bezieht sich der Anteil von 10 % auf den Durchschnitt (Jahresdurchschnitt) europäischer Haushalte, wie er in der PEFCR für T-Shirts auf der Grundlage von Verbraucherstudien und Umfrageergebnissen ermittelt wurde. Die der maschinellen Trocknung zugeordneten Verbrauchswerte entstammen ebenfalls der PEFCR für T-Shirts (PEFCR, 2017). Für die verbleibenden 90 % der gewaschenen Wäsche wurde von einer Trocknung an der freien Luft ausgegangen.

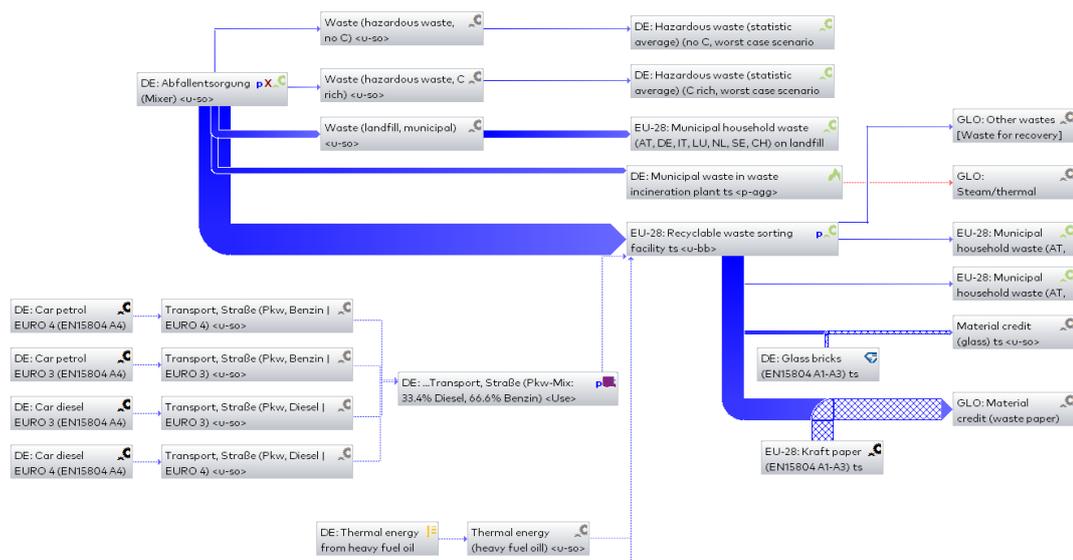


Abbildung 4-4. End-of-Life der verwendeten Verpackungsmaterialien – Modellierung in GaBi 8.7.

Abbildung 4-4 zeigt das Prozessbild zum EoL-Modell für die bei der Nutzung und Pflege des T-Shirts als Abfall anfallenden Verpackungsmaterialien und Haushaltsgeräte (vgl. Tabelle 4-31 und Tabelle 4-32). Die modellierten Stoff- und Energieströme in den jeweiligen Verwertungsmodellen (Verpackungsmaterialien und Haushaltsgeräte) sind in Tabelle 4-33 und Tabelle 4-34 zusammengefasst.

Tabelle 4-33. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess D.06 (End-of-life Modell (Verwertungsmodell) der Verpackungsmaterialien).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Verpackung – T-Shirt (Abfall)	Sekundärdaten	5.70E-02	kg	Tab. 4-21
	Verpackung – Flüssigwaschmittel (Abfall)	—"	1.35E-02	kg	Tab. 4-21
	Verpackung – Waschmaschine (Abfall)	—"	2.15E-03	kg	Tab. 4-21
	Verpackung – Trockner (Abfall)	—"	1.14E-03	kg	Tab. 4-22
EoL ^a	Recycling (68%)	—"	5.02E-02	kg	AN, [1]
	Deponie (18%)	—"	1.33E-02	kg	AN, [1]
	Verbrennung (14%)	—"	1.03E-02	kg	AN, [1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN - Annahme | [1] - (Statistisches Bundesamt, 2017).

Tabelle 4-34. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess D.07 (End-of-life Modell (Verwertungsmodell) der Haushaltsgeräte).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Waschmaschine, verschlissen	Sekundärdaten	7.16E-02	kg	Tab. 4-21
	Trockner, verschlissen	—"	3.80E-02	kg	Tab. 4-22
EoL ^a	Recycling (68%)	—"	5.13E-02	kg	AN, [1]
	Deponie (18%)	—"	1.36E-02	kg	AN, [1]
	Verbrennung (14%)	—"	1.06E-02	kg	AN, [1]

*Menge pro funktioneller Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN - Annahme | [1] - (Statistisches Bundesamt, 2017).

Die mit dem Modul D verbundenen Transportaufwände sind in den Tabellen 4-35 bis 4-37 zusammengefasst und orientieren sich im Wesentlichen an den Angaben für Transporte im PEFCR für T-Shirts (PEFCR, 2017, 2015a, 2015b) und Erhebungen des Kraftfahrt-Bundesamt (KBA, 2013). Die modellierten Transportschritte repräsentieren den europäischen Durchschnitt, wobei davon ausgegangen wird, dass 93 % der T-Shirts im Einzelhandel erworben werden. Der Erwerb der verbleibenden 7 % erfolgt online mit einer angenommenen Retour-Quote von 17.5 % (PEFCR, 2015a). Der mit dem Erwerb des T-Shirts verbundene Transportaufwand ist in Tabelle 4-35 abgebildet.

Tabelle 4-35. Transportmodell tD.01 (Transport T-Shirt → D.04).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	T-Shirt (100 % Baumwolle)	Sekundärdaten	1.56E-01	kg	Tab. 4-21
	Verpackung - T-Shirt	—"	5.70E-02	kg	[2]
	Transport OV ^a , Straße (LKW)	—"	1.38E+01	kgkm	[1,2]
	Transport OV ^a , Straße (Lieferwagen)	—"	4.03E-02	kgkm	[1,2]
	Transport EH ^b , Straße (Personen-Kfz)	—"	4.59E+00	person. km	[1,2, 3]
	Transport EH ^b , Straße (Verkehrsbus)	—"	1.40E-01	person. km	[1,2]
	Transport EH ^b , Schiene (Öffentl. Nahverkehr)	—"	1.00E-01	person. km	AN, [1,2]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (PEFCR, 2015a) | [2] - (PEFCR, 2015b) | [3] - (KBA, 2013).

^a Onlineversand (Transportschritte behinhalten eine Retour-Quote von 17.5 %). ^b Erwerb im Einzelhandel.

Tabelle 4-36. Transportmodell tD.02 (Transport Verpackung → D.06).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Verpackung – T-Shirt (Abfall)	Sekundärdaten	5.70E-02	kg	Tab. 4-33
	Verpackung – Flüssigwaschmittel (Abfall)	—"	1.35E-02	kg	Tab. 4-33
	Verpackung – Waschmaschine (Abfall)	—"	2.15E-03	kg	Tab. 4-33
	Verpackung – Trockner (Abfall)	—"	1.14E-03	kg	Tab. 4-33
	Transport, Straße (Personen-Kfz)	—"	1.15E+00	person. km	AN, [1, 2]
	Transport, Straße (Verkehrsbus)		3.50E-02	person. km	AN, [1]
	Transport, Schiene (Öffentl. Nahverkehr)		2.50E-02	person. km	AN, [1]
	Transport, Straße (Abfalltransportwagen)		1.78E+00	person. km	AN, [1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (PEFCR, 2015b) | [2] - (KBA, 2013).

Tabelle 4-37. Transportmodell tD.03 (Transport Haushaltsgeräte → D.07).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifizität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	Waschmaschine, verschlissen	Sekundärdaten	7.16E-02	kg	Tab. 4-34
	Trockner, verschlissen	—"	3.80E-02	kg	Tab. 4-34
	Transport, Straße (Personen-Kfz)		1.15E+00	person. km	AN, [1,2]
	Transport, Straße (Verkehrsbus)		3.50E-02	person. km	AN, [1]
	Transport, Schiene (Öffentl. Nahverkehr)		2.50E-02	person. km	AN, [1]
	Transport, Straße (Abfalltransportwagen)		1.86E+00	kgkm	AN, [1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN – Annahme | [1] - (PEFCR, 2015b) | [2] - (KBA, 2013).

4.2.5. Lebenswegende (Modul E)

Tabelle 4-38 zeigt die modellierten Stoff- und Energieströme im Prozessmodul E (End-of-life des – nach 44 Wäschen – als verschlissen angenommenen T-Shirts). Die mit der Verwertung des verschlissenen T-Shirts verbundenen Transportaufwände sind in Tabelle 4-39 zusammengefasst. Die Daten orientieren sich im Wesentlichen an den Angaben für Transporte für T-Shirts (PEFCR, 2017) und Erhebungen des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA, 2013).

Tabelle 4-38. Modellierte Stoff- und Energieströme im Teilprozess E.01 (End-of-life des abgetragenen T-Shirts).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	T-Shirt (100 % Baumwolle), verschlissen	Sekundärdaten	1.56E-01	kg	AN
EoL ^a	Downcycling (11 %)	—"–	1.71E-02	kg	AN, [1]
	Deponie (52 %)	—"–	8.04E-02	kg	AN, [1]
	Verbrennung (37 %)	—"–	5.83E-02	kg	AN, [1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN - Annahme | [1] - (PEFCR, 2017).

^a End-of-life Modell (Verwertungsmodell).

Tabelle 4-39. Transportmodell tE.01 (Transport T-Shirt → E.01).

Bezug	Stoff-/ Energieströme	Spezifität	Menge*	Einheit	DQ**
Input	T-Shirt (100 % Baumwolle), verschlissen	Sekundärdaten	1.56E-01	kg	Tab. 4-34
	Transport, Straße (Personen-Kfz)		1.15E+00	person. km	AN, [1,2]
	Transport, Straße (Verkehrsbus)		3.50E-02	person. km	AN, [1]
	Transport, Schiene (Öffentl. Nahverkehr)		2.50E-02	person. km	AN, [1]
	Transport, Straße (Abfalltransportwagen)		4.68E+00	kgkm	AN, [1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: AN - Annahme | [1] - (PEFCR, 2015b) | [2] - (KBA, 2013).

5. Wirkungsabschätzung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (d. h. die Ressourceninanspruchnahme und die potenziellen Umweltwirkungen) des Lebenswegs eines in unterschiedlichen Ländern hergestellten, in Deutschland importiert, genutzten und entsorgten handelsüblichen weißen Baumwolle T-Shirts dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf die bilanzierten Prozessmodule und zugehörigen Teilprozesse (vgl. Kapitel 4).

Zunächst werden anhand der Ausgangsvariante (durchschnittliche Waschtemperatur von 43.3 °C, vgl. Kapitel 4.6) die Anteile der unterschiedenen Lebenswegphasen, bzw. Prozessmodule, an den ausgewählten Indikatorwerten dargestellt (Beitragsanalyse, Kapitel 5.1). Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.7 werden die Wirkungskategorien Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP), Versauerungspotenzial (AP), Terrestrisches Eutrophierungspotenzial (EP), Ökotoxpotenzial Frischwasser (FAETP), Treibhauspotenzial (GWP 100), Ökotoxpotenzial Salzwasser (MAETP), Landnutzung (LU) und Ressourcenverbrauch, Wasser (WDP) betrachtet. Anschließend werden im Rahmen einer umfassenden Szenarienanalyse die Umweltwirkungen verschiedener Varianten der Wäschepflege dargestellt und verglichen (Szenarioanalyse in Kapitel 5.2).

5.1. Beitragsanalyse

Eine Zusammenfassung der absoluten Werte der Umweltwirkungen eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts – unter der Voraussetzung einer 44-maligen Wäschepflege bei einer durchschnittlichen Waschtemperatur von 43.3 °C – in den acht betrachteten Wirkungskategorien findet sich in Tabelle 5-1. Dargestellt sind die Gesamtauswirkungen, d. h. die Wirkungen über dem gesamten Lebensweg sowie die Wirkungen in den einzelnen Lebenswegphasen (Prozessmodulen).

Tabelle 5-1. Umweltwirkungen der unterschiedenen Lebenswegphasen eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts entsprechend ausgewählter Wirkungsabschätzungskategorien.

Modul	ADP kg Sb-Äqv.	AP kg SO ₂ -Äqv.	EP mol N-Äqv	FAETP kg DCB-Äqv.	GWP kg CO ₂ -Äqv.	MAETP kg DCB-Äqv.	LU DIV. ^b	WDP m ³ H ₂ O-Äqv.
∑ Lebenswegphasen ^a	7.00E-06	2.13E-02	5.18E-03	3.96E-01	3.70E+00	1.27E+03	3.76E+01	2.19E-01
Herstellung Vorprodukte	2.39E-07	1.19E-02	2.11E-03	7.28E-02	7.60E-01	5.57E+02	3.54E+01	8.20E-02
Fertigung T-Shirt	4.73E-06	5.03E-03	1.53E-03	3.10E-01	8.16E-01	4.26E+02	1.09E+00	7.81E-03
Handel & Vertrieb	1.72E-07	9.23E-04	1.71E-04	5.71E-03	1.49E-01	2.77E+01	4.45E-01	1.64E-03
Waschen ^b	1.21E-06	3.10E-03	1.25E-03	7.29E-03	1.69E+00	2.29E+02	5.64E-01	1.11E-01
Trocknen ^b	6.56E-07	3.32E-04	5.09E-05	4.03E-04	2.00E-01	3.13E+01	9.79E-02	1.81E-02
Lebenswegende (T-Shirt)	-9.42E-09	2.19E-05	7.67E-05	-8.86E-06	9.23E-02	-1.56E+00	-1.11E-02	-1.49E-03

^a Summe der unterschiedenen Lebenswegphasen (Module) des T-Shirts. Maßgebende Teilprozesse im Modul D (Nutzung und Pflege des T-Shirts). ^b Diverse: Das LANCA-Modell bewertet die Umweltwirkungen der Landnutzung auf der Grundlage verschiedener Indikatoren deren Ergebnisse in einem dimensionlosen Index zusammengefasst werden.

Eine bildliche Darstellung der relativen Anteile der einzelnen Lebenswegphasen bzw. betrachteten Prozesse zu den Gesamtumweltwirkungen zeigt Abbildung 5-1. Wie zu erkennen

ist, leisten die Herstellung der Vorprodukte, die T-Shirt-Herstellung und das 44-malige Waschen die größten Beiträge zu den einzelnen Wirkungskategorien.

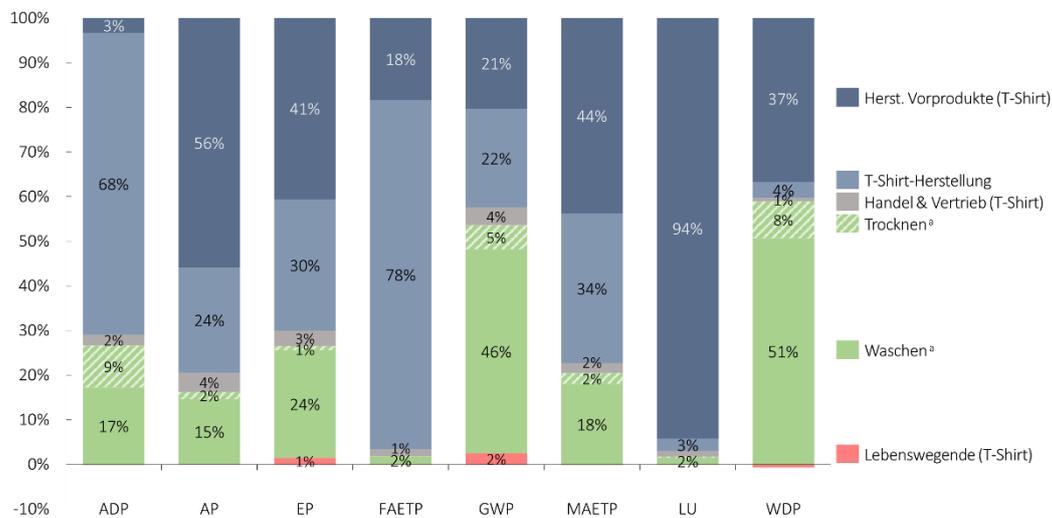


Abbildung 5-1. Umweltwirkungen der unterschiedenen Lebenswegphasen im Verhältnis zum Gesamtergebnis in den untersuchten Wirkungskategorien.

^a Maßgebende Teilprozesse im Modul D (Nutzung und Pflege des T-Shirts bei 44-maligem Waschen/Trocknen).

Der Prozess Herstellung der Vorprodukte dominiert mit einem Beitrag von 94 % die Kategorie LU. Einen signifikanten Beitrag leistet er mit mindestens 37 % außerdem zu den Kategorien AP, EP, MAETP und WDP und mit etwa 20 % zu den Kategorien FAETP und GWP. Der Beitrag zur Kategorie Ressourcenverbrauch (ADP) ist vernachlässigbar (3 %). Die Umweltwirkungen der Vorprodukte in den Kategorien LU, EP und WDP sind nahezu ausschließlich auf die Produktion der Baumwolle zurückzuführen. Die Ergebnisse der Vorprodukte in den Kategorien AP, MAETP und GWP sind hingegen im entscheidenden Maße durch den relativ hohen Energiebedarf (Stromverbrauch) in der Spinn garnherstellung zu erklären (siehe auch Tabelle 4-2).

Der Prozess T-Shirt-Herstellung leistet in allen Wirkungskategorien mit Ausnahme von LU und GWP einen deutlichen Beitrag zu den Gesamtumweltwirkungen. Er dominiert mit 70-80 % in den Kategorien ADP und FAETP. Einen deutlichen Beitrag leistet er mit 22-34 % außerdem in den Kategorien AP, EP, GWP und MAETP. Der relativ hohe Beitrag der T-Shirt-Herstellung in der Kategorie ADP ist vorrangig auf die im Finishing-Prozess (Submodul im Teilprozess D.03) verwendeten Chemikalien zurückzuführen, insbesondere auf das antimikrobiell wirkenden Silber (siehe auch Tabelle 4-11). Der Finishing-Prozess verantwortet auch den hohen Beitrag in der Kategorie FAETP, allerdings erklärt sich dieses Ergebnis hauptsächlich durch direkte Emissionen ins Frischwasser (siehe auch Anhang B, Tabelle A-2).

Der Prozess des 44-maligen Waschens leistet ebenfalls in allen Wirkungskategorien mit Ausnahme von LU und FAETP einen deutlichen Beitrag an den Gesamtumweltwirkungen, wenn auch tendenziell geringer als bei den Prozessen Herstellung der Vorprodukte und Fertigung des

T-Shirts. Er dominiert mit jeweils etwa 50 % in den Kategorien GWP und WDP und beträgt etwa 20 % in den Kategorien AP, ADP und EP.

Der Prozess des 44-maligen Trocknens leistet, unter der Annahme, dass jeweils nur 10 % der Wäsche in einem Wäschetrockner getrocknet wird, einen nur geringen Anteil an den Gesamtumweltwirkungen. Mit 9 % bzw. 8 % leistet das Trocknen einen relevanten Beitrag in den Kategorien ADP bzw. WDP. In allen anderen Kategorien trägt das Trocknen weniger als 4 % zu den Indikatorergebnissen bei.

Der Handel und Vertrieb des T-Shirts sowie dessen Lebenswegende haben einen nur sehr geringen Anteil an den Gesamtumweltwirkungen. Der Anteil des Prozesses Handel und Vertrieb beträgt maximal 4 % (in den Kategorien AP und GWP), der vom Lebenswegende des T-Shirts maximal 2 % (in der Kategorie GWP). Weiterführende Erklärungen zu den Beiträgen der einzelnen Prozesse bzw. der mit ihnen verbundenen Stoff- und Energieflüsse finden sich in der Szenarioanalyse in Kapitel 5.2.

Die Umweltwirkungen des Vordergrundsystems (Nutzung und Pflege des T-Shirts) werden in den folgenden Kapiteln näher beleuchtet.



Abbildung 5-2. Relative Beiträge des Waschens und Trocknens (10 % maschinelle Trocknung) zu den Umweltwirkungen im Modul D (Nutzung und Pflege des T-Shirts).

^a Maßgebende Teilprozesse im Modul D (Nutzung und Pflege des T-Shirts).

Abbildung 5-2 illustriert den relativen Beitrag des Waschens und Trocknens zu den Umweltwirkungen der Nutzungsphase. Wenn 10 % der Wäsche maschinell getrocknet werden, dominiert der Prozess Waschen in allen Umweltkategorien mit einem Anteil von 86-96 %. Einen deutlichen Beitrag leistet das maschinelle Trocknen mit 35 % nur in der Kategorie ADP.

Die Umweltwirkungen innerhalb des Prozesses Waschen werden in Abbildung 5-3 näher beleuchtet.

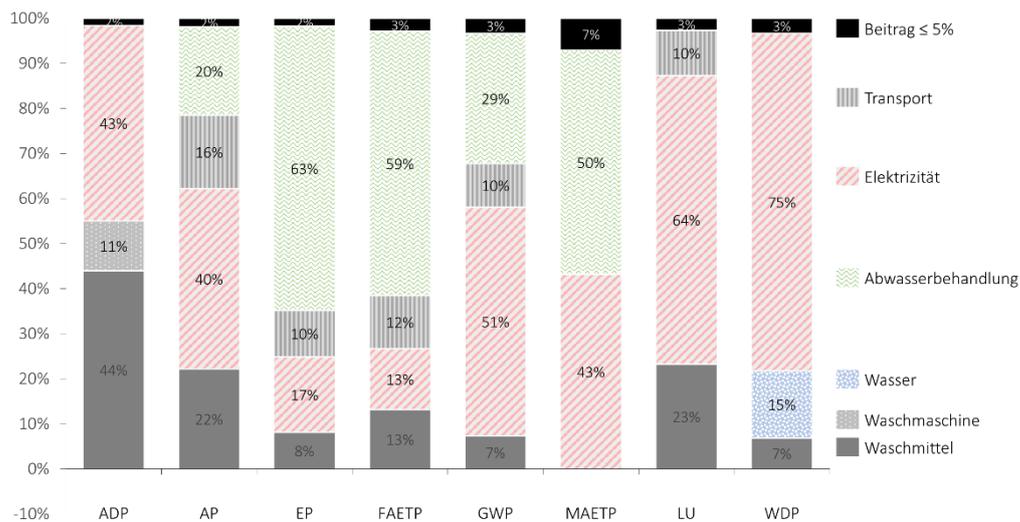


Abbildung 5-3. Zusammensetzung der Umweltwirkungen im Teilprozess Waschen (Nutzung und Pflege des T-Shirts).

Die Bereitstellung von Elektrizität und Waschmittel sowie die Behandlung der anfallenden Abwasser leisten die jeweils größten Beiträge zu den Gesamtumweltwirkungen im Prozess Waschen. Die mit der Elektrizitätsbereitstellung verbundenen Umweltwirkungen ^a dominieren mit 40-75 % in allen Wirkungskategorien außer EP und FAETP. Der Beitrag der Abwasserbehandlung ist mit 50-63 % am höchsten in den Kategorien EP, FAETP und MAETP, ebenfalls deutlich bei AP und GWP (20-29 %) und sonst vernachlässigbar. Durch das Waschmittel verursachte Umweltwirkungen sind signifikant in den Kategorien ADP (44 %) sowie AP und LU (ca. 20 %). Transporte leisten mit 10-16 % einen sichtbaren aber vergleichsweise geringen Beitrag zu allen Kategorien (außer MAETP und WDP). Der Beitrag der Waschmaschine ist, unter der Annahme, dass diese erst nach 10 Jahren ausgetauscht wird, vernachlässigbar. Das beim Waschen direkt verwendete Wasser leistet nur in der Kategorie WDP einen sichtbaren Beitrag (15 %).

5.2. Szenarioanalyse

In diesem Kapitel werden die Umweltwirkungen eines weißen Baumwolle T-Shirts in Abhängigkeit verschiedener Waschprogrammparameter dargestellt. Betrachtet werden Pflegeleichtwaschgänge in den Waschttemperaturen: 30 °C, 40 °C, 43.3 °C (Ausgangslage) und 60 °C – entsprechend den in Kapitel 3.2 und 4.2.4. definierten Waschszenarien. Die Ergebnisse werden im Folgenden für die acht Wirkungskategorien separat vorgestellt. Weitere Annahmen zur Wäschepflege und deren Einfluss auf die Gesamtumweltwirkungen werden im Kapitel 6.2 im Rahmen der Sensitivitätsprüfung näher untersucht.

^a Umweltwirkungen, die sich aus der Herstellung der für den Betrieb der Waschmaschine benötigten elektrischen Energie ergeben.

In allen folgenden Abbildungen (Abbildung 5-4 bis Abbildung 5-11) ist die Ausgangslage, d. h. der Einsatz von Flüssigwaschmitteln bei einer Temperatur von 43.3 °C, als Referenz auf 100 % gesetzt. Die Änderungen der Umweltwirkungen (im Prozess Nutzung und Pflege) bei veränderten Waschttemperaturen (und damit verbunden veränderten Verbrauchswerten) sind relativ dazu dargestellt. Im Folgenden wird einheitlich von „Waschprogrammeinstellungen“ gesprochen.

Ressourcenverbrauch, elementar (ADP)

Die Ergebnisse für die Wirkungskategorie ADP werden mit 68 % im Wesentlichen durch die T-Shirt-Herstellung bestimmt. Grund hierfür sind vor allem die bei der T-Shirt-Herstellung verwendete Energie (z. B. Einsatz von Dampf beim Krumpfen). Mit etwa 25 % hat auch die Nutzung und Pflege des T-Shirts einen erheblichen Anteil am Indikatorergebnis. Die Prozesse Handel und Vertrieb sowie die Herstellung der Vorprodukte leisten einen vernachlässigbaren Beitrag (Abbildung 5-4).

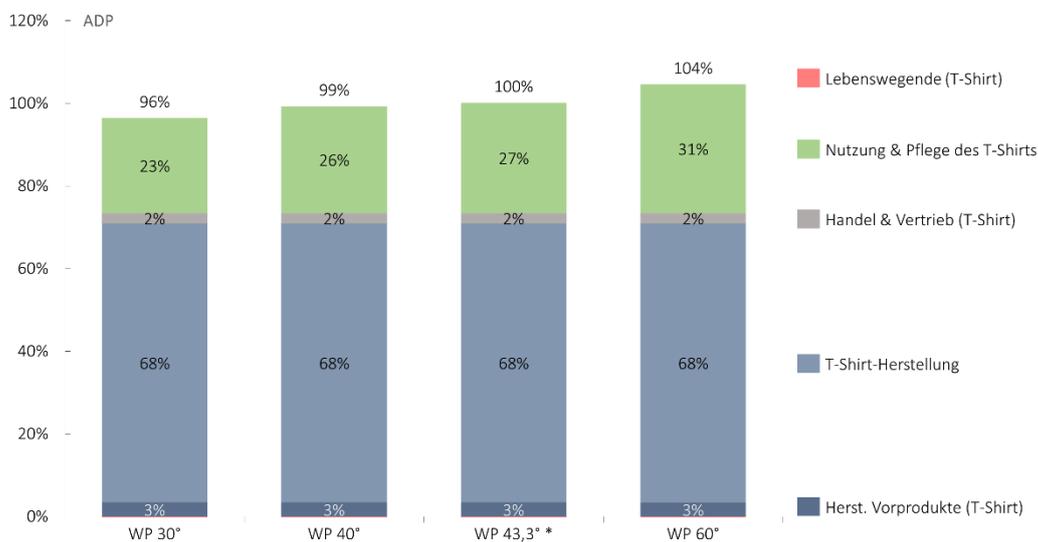


Abbildung 5-4. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1% zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (durchschnittliche Waschprogrammeinstellungen, vgl. Kapitel 4.2).

Verringert man bei 44-maligem Waschen die Waschttemperaturen von 43.3 °C auf 30 °C, sinken die Umweltwirkungen um 4 %. Erhöht man die Temperatur auf 60 °C, steigen sie um 4 %. Insgesamt kann damit der Einfluss der Waschttemperaturen auf das Ergebnis der Wirkungskategorie ADP als gering eingestuft werden.

Der geringe Einfluss ist darauf zurückzuführen, dass 1) der Beitrag des Prozesses Nutzung und Pflege vergleichsweise gering ist und 2) der mit dem Waschen verbundene Stromverbrauch (der im Wesentlichen von der Temperaturänderung betroffen ist) nur einen Anteil von etwa 7 % an den gesamten Indikatorergebnissen hat (vgl. Abbildung 5-1 und Abbildung 5-4).

Versauerungspotenzial (AP)

Die Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie AP werden im Wesentlichen durch die Herstellung der Vorprodukte für das T-Shirt (56 %) und T-Shirt-Herstellung (24 %) bestimmt. Vor allem die Baumwolleproduktion (Herstellung der Vorprodukte) leistet hier einen erheblichen Beitrag (Versauerung durch die intensive Düngung landwirtschaftlicher Böden). Die Nutzung und Pflege des T-Shirts bestimmt das Indikatorendergebnis mit etwa 16 %. Die Prozesse Handel und Vertrieb sowie Lebenswegende (T-Shirt) leisten einen vernachlässigbaren Beitrag (Abbildung 5-5).

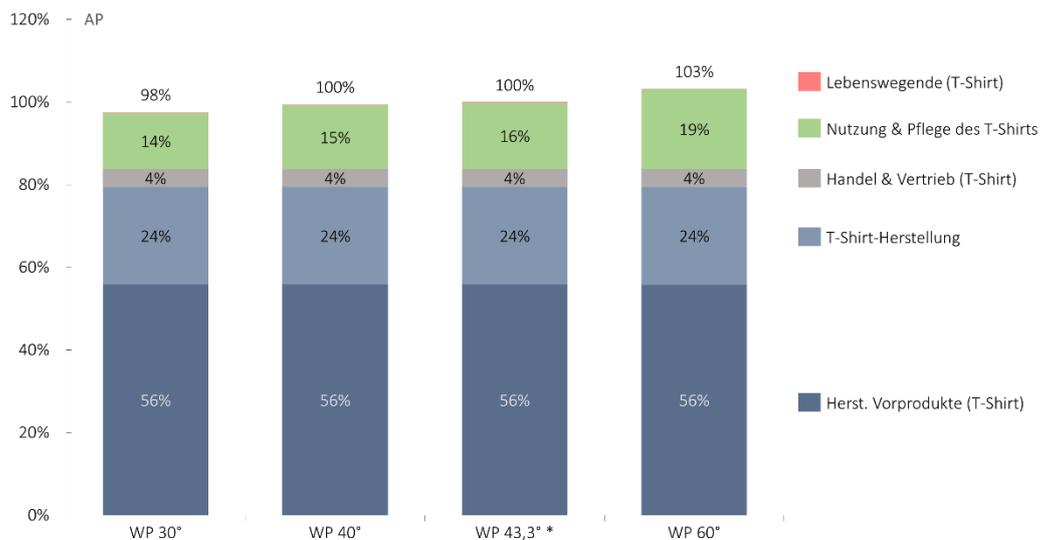


Abbildung 5-5. Versauerungspotenzial (AP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1% zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (durchschnittliche Waschprogrammeinstellungen, vgl. Kapitel 4.2).

Verringert man die Waschtemperatur von 43,3 °C auf 30 °C, sinken die Umweltwirkungen um 2 %. Erhöht man die Temperatur auf 60 °C, steigen sie um 3 %. Insgesamt kann damit der Einfluss der Waschtemperatur auf das Ergebnis in der Wirkungskategorie AP als gering eingestuft werden.

Eutrophierung, terrestrisch (EP)

Die Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie EP werden im Wesentlichen durch die Herstellung der Vorprodukte für das T-Shirt (41 %), T-Shirt-Herstellung (30 %) sowie die 44-malige Nutzung und Pflege des T-Shirts (etwa 25 %) bestimmt. Die Prozesse Handel und Vertrieb sowie die Verwertung des T-Shirts am Lebenswegende leisten einen vernachlässigbaren Beitrag (Abbildung 5-6).

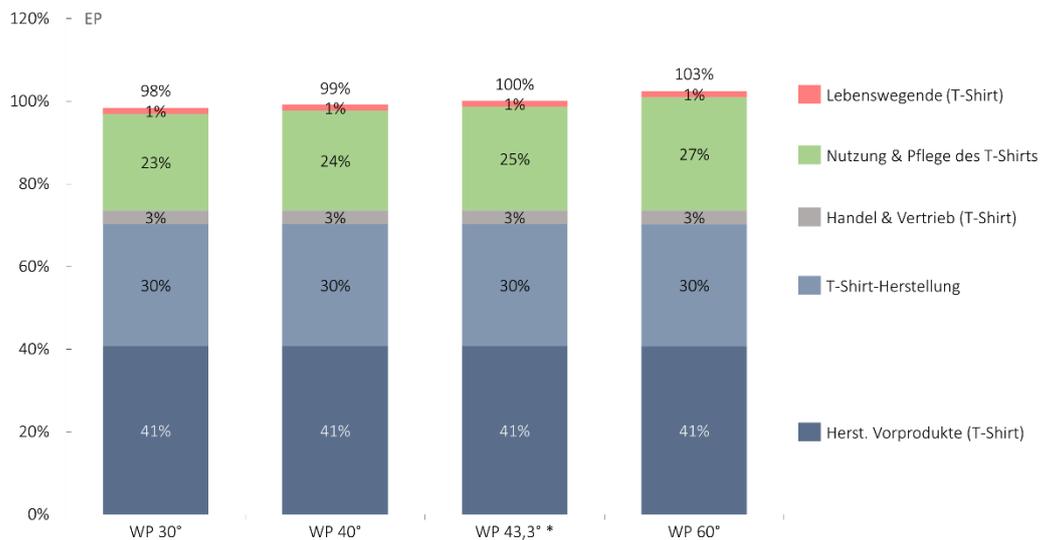


Abbildung 5-6. Eutrophierung, terrestrisch (EP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1% zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (durchschnittliche Waschprogrammeinstellungen, vgl. Kapitel 4.2).

Verringert man die Waschtemperatur von 43,3 °C auf 30 °C, sinken die Umweltwirkungen um 2 %. Erhöht man die Temperatur auf 60 °C, steigen sie um 3 %. Insgesamt kann damit der Einfluss der Waschtemperatur auf die Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie EP als gering eingestuft werden.

Ökotoxpotenzial, aquat. Frischwasser (FAETP)

Die Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie FAETP werden im Wesentlichen durch die Prozesse T-Shirt-Herstellung (78 %) sowie Herstellung der Vorprodukte für das T-Shirt (18 %) bestimmt. Die Prozesse Nutzung und Pflege des T-Shirts, Handel und Vertrieb sowie Lebenswegende (T-Shirt) leisten einen vernachlässigbaren Beitrag (Abbildung 5-7).

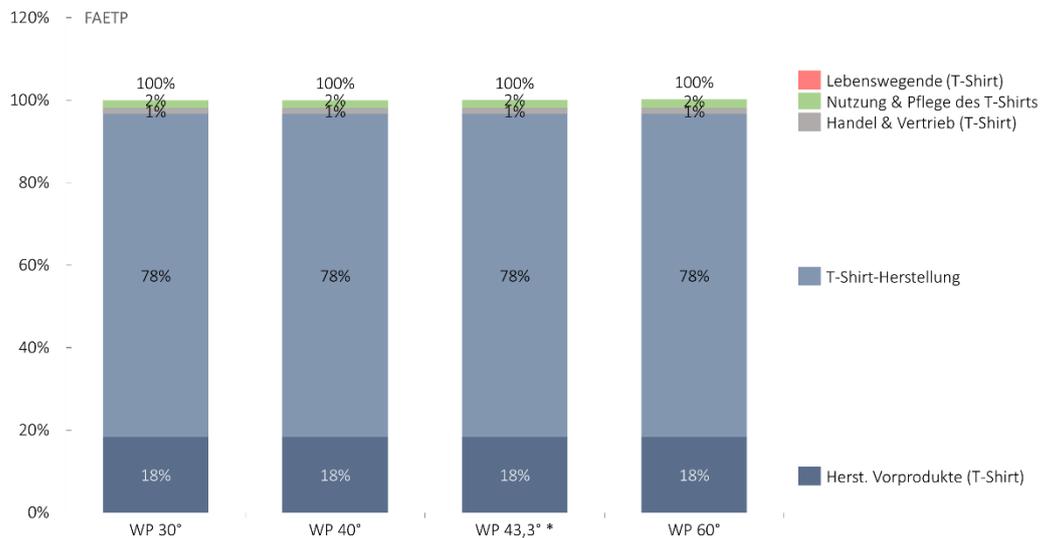


Abbildung 5-7. Ökotoxpotenzial, aquat. Frischwasser (FAETP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1% zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (durchschnittliche Waschprogrammeinstellungen, vgl. Kapitel 4.2).

Aufgrund des sehr geringen Anteils des Prozesses Nutzung und Pflege an den Gesamtumweltwirkungen (etwa 2 %) hat eine Änderung in diesem Prozess – z. B. die hier betrachtete Senkung bzw. Erhöhung der Waschttemperatur – keinen erkennbaren Einfluss auf die Indikatorergebnisse.

Treibhauspotenzial (GWP)

Die Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie GWP werden im Wesentlichen durch die Prozesse Nutzung und Pflege des T-Shirts (mindestens 40 %), Herstellung der Vorprodukte für das T-Shirt (21 %) sowie T-Shirt-Herstellung (22 %) bestimmt. Die Prozesse Handel und Vertrieb sowie Lebenswegende (T-Shirt) leisten mit 4 % bzw. 2 % einen vernachlässigbaren Beitrag (Abbildung 5-8).

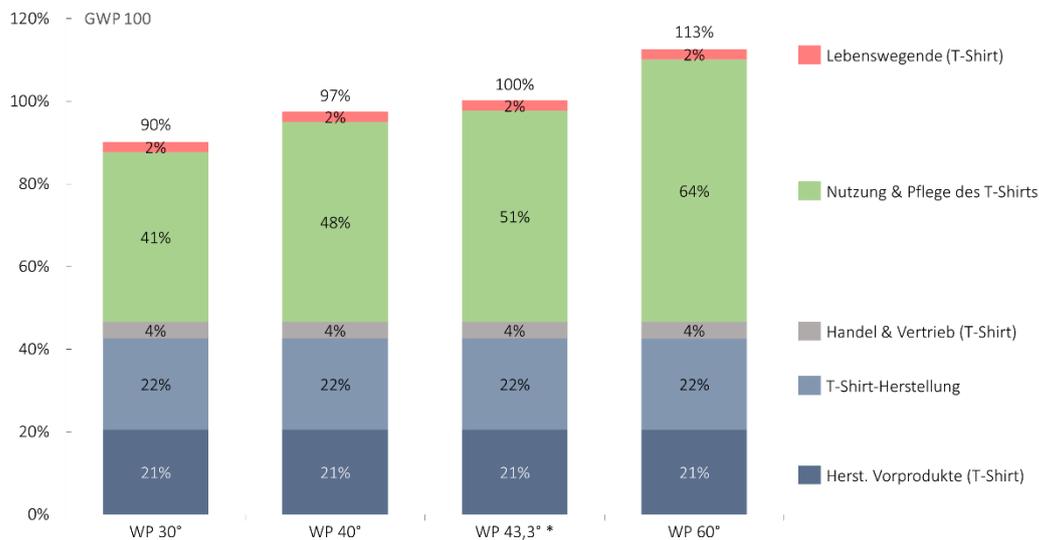


Abbildung 5-8. Treibhauspotenzial (GWP 100) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1% zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (durchschnittliche Waschprogrammeinstellungen, vgl. Kapitel 4.2).

Die gewählten Waschprogrammeinstellungen haben einen signifikanten Einfluss auf die Indikatorergebnisse. Verringert man die Waschtemperatur von 43,3 °C auf 30 °C, sinken die Umweltwirkungen um 10 %. Erhöht man die Temperatur auf 60 °C, steigen sie um 13 %. Der Einfluss der Waschtemperatur auf das GWP des T-Shirts ist daher als eher hoch einzustufen.

Ökotoxpotenzial, aquat. Salzwasser (MAETP)

Die Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie MAETP werden im Wesentlichen durch die Prozesse Herstellung der Vorprodukte für das T-Shirt (44 %), T-Shirt-Herstellung (34 %) sowie Nutzung und Pflege des T-Shirts (etwa 20%) bestimmt. Der Prozess Handel und Vertrieb leistet einen vernachlässigbaren Beitrag (Abbildung 5-9).

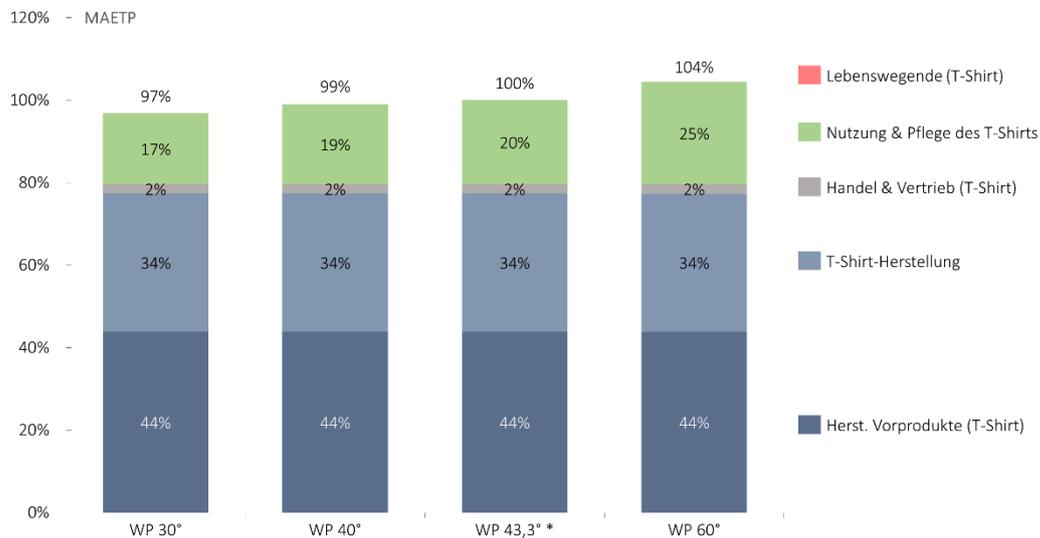


Abbildung 5-9. Ökotoxpotenzial, aquat. Salzwasser (MAETP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1% zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (durchschnittliche Waschprogrammeinstellungen, vgl. Kapitel 4.2).

Verringert man die Waschttemperatur von 43,3 °C auf 30 °C, sinken die Umweltwirkungen um 3 %. Erhöht man die Temperatur auf 60 °C, steigen sie um 4 %. Insgesamt kann damit der Einfluss der Waschttemperatur auf die Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie MAETP als gering eingestuft werden.

Landnutzung (LU)

Die Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie LU werden im Wesentlichen durch die Herstellung der Vorprodukte für das T-Shirt (94 %) bestimmt. Alle anderen Prozesse haben einen vernachlässigbaren Beitrag (Abbildung 5-10).

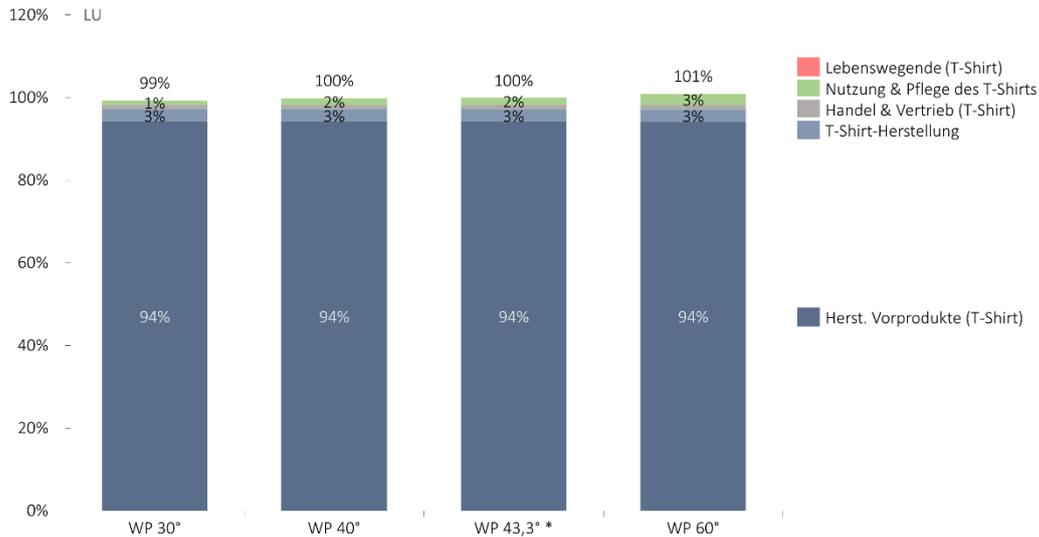


Abbildung 5-10. Landnutzung (LU) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1% zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (durchschnittliche Waschprogrammeinstellungen, vgl. Kapitel 4.2).

Aufgrund des sehr geringen Anteils des Prozesses Nutzung und Pflege an den Gesamtumweltwirkungen (ca. 2 %) hat eine Änderung in diesem Prozess – z. B. die hier betrachtete Senkung bzw. Erhöhung der Waschttemperatur – keinen erkennbaren, bzw. nennenswerten, Einfluss auf die Wirkungskategorie LU.

Ressourcenverbrauch, Wasser (WDP)

Die Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie WDP werden im Wesentlichen durch die Prozesse Nutzung und Pflege des T-Shirts (mindestens 43%) sowie die Herstellung der Vorprodukte für das T-Shirt (37 %) bestimmt. Die anderen Prozesse leisten einen vernachlässigbaren Beitrag (Abbildung 5-11).

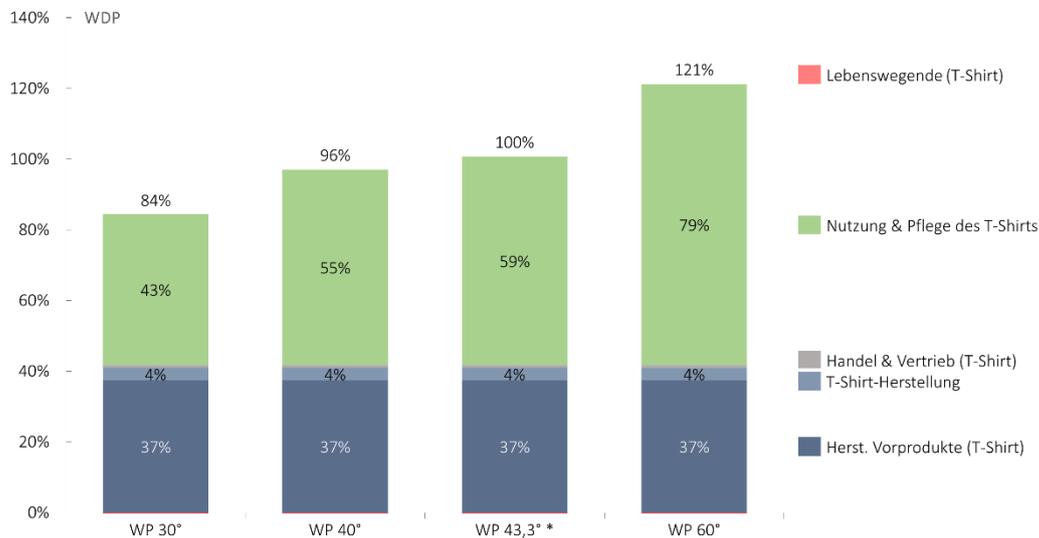


Abbildung 5-11. Ressourcenverbrauch Wasser (WDP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts unter Voraussetzung verschiedener Waschprogrammeinstellungen (WP). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1% zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (durchschnittliche Waschprogrammeinstellungen, vgl. Kapitel 4.2).

Auch in der Kategorie WDP ergeben sich durch die Veränderung der Waschprogrammeinstellungen signifikante Unterschiede. Verringert man die Waschtemperatur von 43,3 °C auf 30 °C, sinken die Umweltwirkungen deutlich um 16 %. Erhöht man die Temperatur auf 60 °C, steigen sie deutlich um 21 %. Insgesamt kann damit der Einfluss der Waschtemperatur auf das Ergebnis in der Wirkungskategorie WDP als hoch eingestuft werden. Zurückzuführen ist dies darauf, dass der relativ hohe Beitrag des Waschens maßgeblich dem Stromverbrauch zuzuschreiben ist (vgl. Abbildung 5-3) – jenem Parameter also, welcher von den Waschprogrammeinstellungen am meisten betroffen ist. Die Bereitstellung von Strom, etwa durch den Abbau und die Verbrennung von Braunkohle, beeinträchtigt auch die Verfügbarkeit und Qualität natürlicher Wasservorkommen (z. B. in Folge der Grundwasserabsenkung im Tagebau, der Wasserdampferzeugung, oder der Nutzung in Kühlsystemen), weshalb Änderungen in der Waschtemperatur sich gleichfalls auch in den Ergebnissen für WDP spiegeln.

6. Auswertung

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Ökobilanz ausgewertet. Hierzu werden zunächst Parameter und Annahmen, die das Ergebnis der Ökobilanz wesentlich beeinflussen, herausgearbeitet und diskutiert. Die signifikanten Parameter in dieser Ökobilanz werden näher betrachtet und die zu prüfenden Punkte einer Sensitivitätsprüfung unterzogen. Weiter erfolgen eine Vollständigkeits- und Konsistenzprüfung. Abschließend geht Kapitel 6.4 zusammenfassend auf Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen ein, die sich aus der Ökobilanz ergeben.

6.1. Identifikation der signifikanten Parameter

Die lebenszyklusbasierten Umweltwirkungen eines herkömmlichen weißen Baumwolle T-Shirts werden maßgeblich durch die Baumwolleproduktion und die Prozesse der T-Shirt-Herstellung bestimmt (Kapitel 5.1). Dieses Ergebnis deckt sich im Wesentlichen mit den Ergebnissen von Jewell et al. (2017) und PEFCR (2017).

Die Umweltwirkungen im Modul D (Nutzung und Pflege des T-Shirts) werden entscheidend durch den Waschvorgang geprägt. Neben dem Waschmitteleinsatz, haben vor allem der Strom- und Wasserverbrauch einen entscheidenden Anteil an den gemessenen Umweltwirkungen (vgl. Kapitel 5.1 und 5.2). Inwiefern die angenommenen Nutzungsparameter eine signifikante Auswirkung auf das Gesamtergebnis haben, wird in einer Sensitivitätsprüfung in Kapitel 6.2 betrachtet.

6.2. Sensitivitätsprüfung

Im Folgenden wird die Sensitivität der Ergebnisse der Ökobilanz anhand von ausgewählten, ergebnisrelevanten Einflussgrößen dargestellt und diskutiert. Die Sensitivitätsprüfung dient auch dazu die Unsicherheiten einer Ökobilanz einzuschätzen und einzuschränken. Da die ökobilanzielle Bewertung der Baumwolleproduktion und T-Shirt-Herstellung jener von Jewell et al. (2017) und PEFCR (2017) weitestgehend entspricht, sind Unsicherheiten in dieser Studie vor allem in den Annahmen zur Nutzung und Pflege des T-Shirts zu sehen. Annahmen zu Wäschepflegepraktiken beinhalten Festlegungen in Bezug auf die Art, Form und Dosierung der verwendeten Waschmittel, die genutzte Waschmaschine und das gewählte Programm, als auch die Art und Weise der Wäschetrocknung. Es werden daher folgende Nutzungsparameter einer Sensitivitätsprüfung unterzogen:

- Anteil der Maschinentrocknung (MT)
- Waschmitteldosierung (WMD)
- Waschmaschinenbeladung (MB)
- Waschkhäufigkeit (WHF)

Die Ergebnisse der veränderten Wäschepflegeparameter sowie die Erläuterung der zugrunde gelegten Daten und Annahmen werden in den folgenden Unterkapiteln diskutiert.

6.2.1. Anteil der Maschinentrocknung

Die Art der Trocknung (maschinell oder im Freien an der Luft) hat einen entscheidenden Einfluss auf die Umweltwirkungen des T-Shirts – zumindest wenn der Anteil der maschinellen Trocknung den 10 %-Anteil der Ausgangslage überschreitet. Dies zeigt sich insbesondere in den Wirkungskategorien, die sensibel auf die Bereitstellung von Elektrizität reagieren, d. h., ADP, GWP und WDP (Abbildung 6-1 bis Abbildung 6-3).

In Haushalten, wo die Wäsche ausschließlich maschinell getrocknet wird (MT 100 %), sind die Umweltwirkungen in der Kategorie ADP (Abbildung 6-1) fast doppelt so hoch wie die in der Ausgangslage (10 % Maschinentrocknung). In den Kategorien GWP und WDP verursacht eine Zunahme des Anteils der maschinellen Trocknung auf 100 % einen Anstieg der Indikatorergebnisse von etwa 50 bzw. 75 % (vgl. Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3).

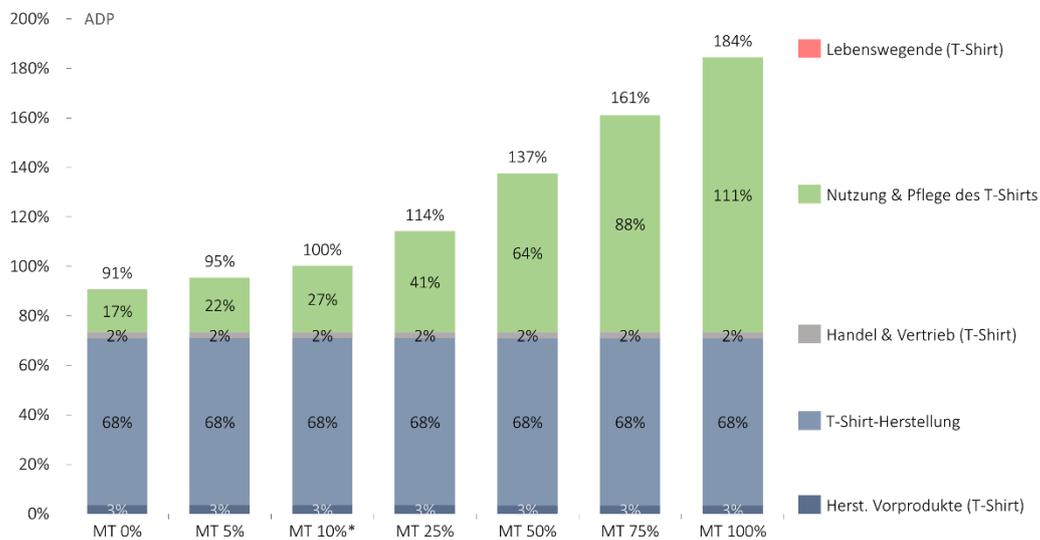


Abbildung 6-1. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei verändertem Einsatz der maschinellen Trocknung (MT: 0 bis 100 %). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1 % zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (10 % der gewaschenen Wäsche wird maschinell getrocknet, vgl. Kapitel 4.2.).

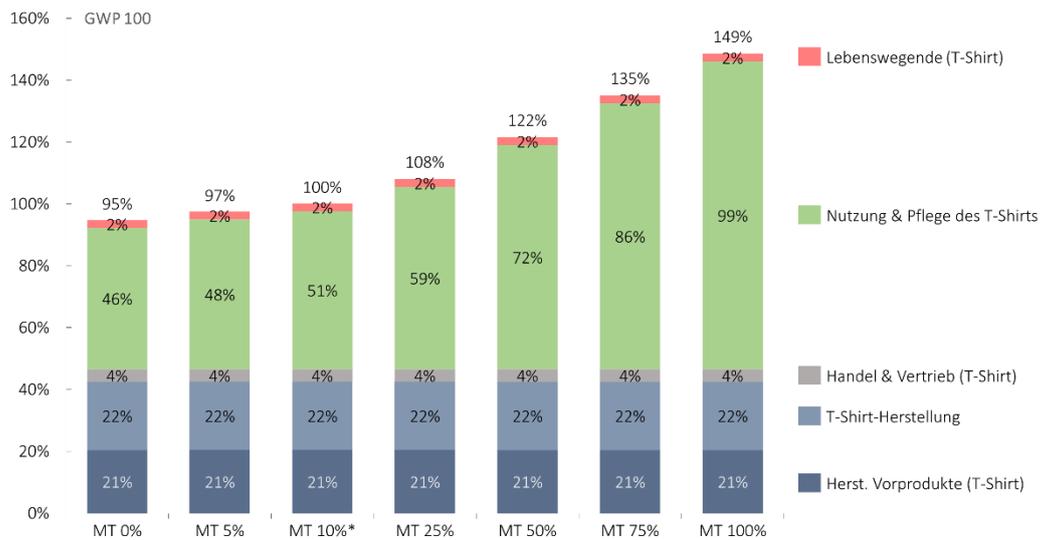


Abbildung 6-2. Treibhauspotenzial (GWP 100) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei verändertem Einsatz der maschinellen Trocknung (MT: 0 bis 100 %). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1 % zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (10 % der gewaschenen Wäsche wird maschinell getrocknet, vgl. Kapitel 4.2).

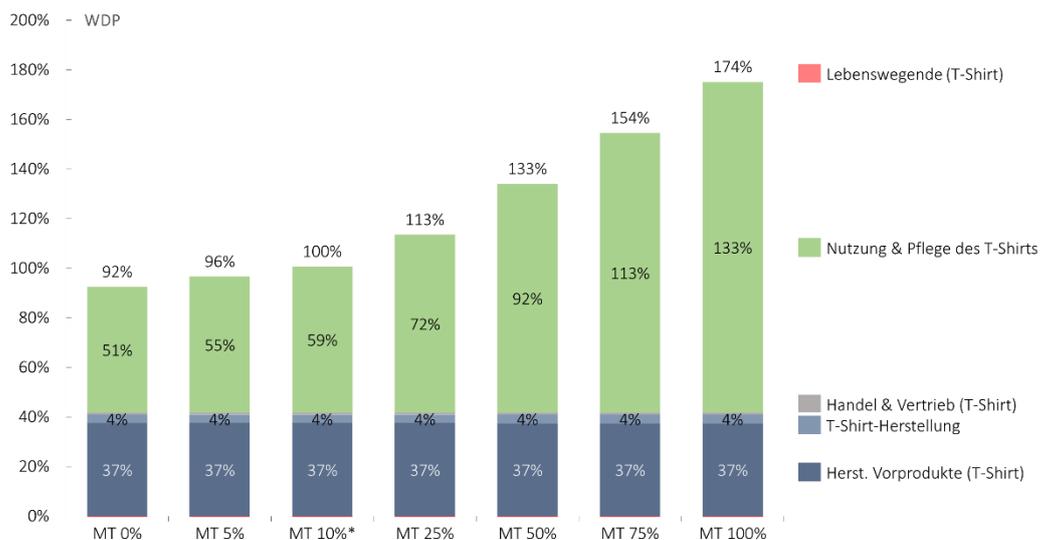


Abbildung 6-3. Ressourcenverbrauch Wasser (WDP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei verändertem Einsatz der maschinellen Trocknung (MT: 0 bis 100 %). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1 % zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (10 % der gewaschenen Wäsche wird maschinell getrocknet, vgl. Kapitel 4.2).

6.2.2. Waschmitteldosierung

Im Rahmen der Sensitivitätsprüfung wurden die Umweltwirkungen verschiedener Waschmitteldosierungen getestet. Eine Erhöhung der Dosierung hatte in allen Umweltkategorien einen merklichen Anstieg der Umweltwirkungen zur Folge. Die Unterschiede zwischen den getesteten Dosierungsstufen (35 ml – 200 ml) zeigten sich vor allem in den Wirkungskategorien ADP, AP, GWP und EP (Abbildung 6-4 bis Abbildung 6-7).

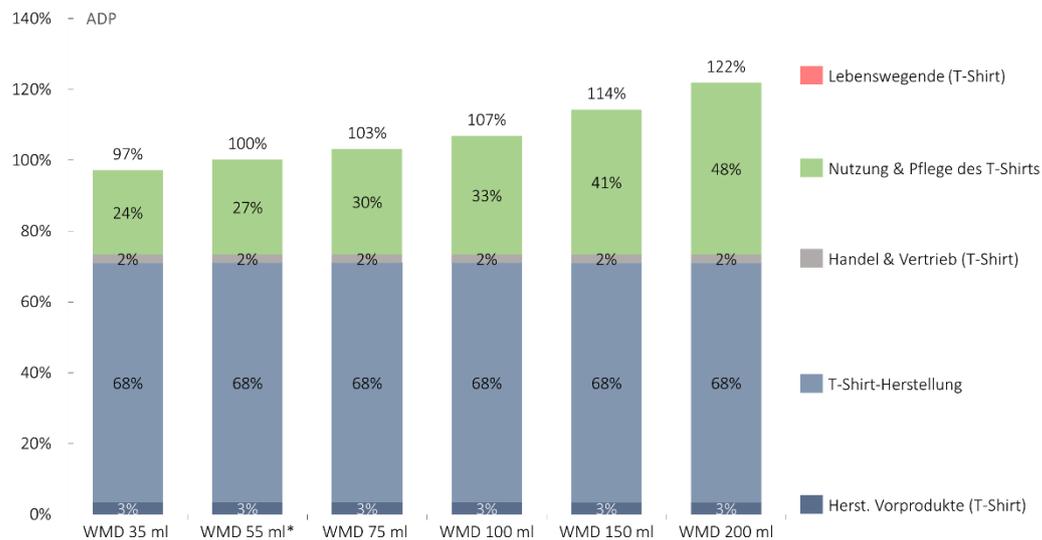


Abbildung 6-4. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmitteldosierung (WMD: 35 bis 200 ml). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1 % zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (Einsatz von 55 ml Waschmittel pro Waschgang für 3.5 kg Wäsche, vgl. Kapitel 4.2).

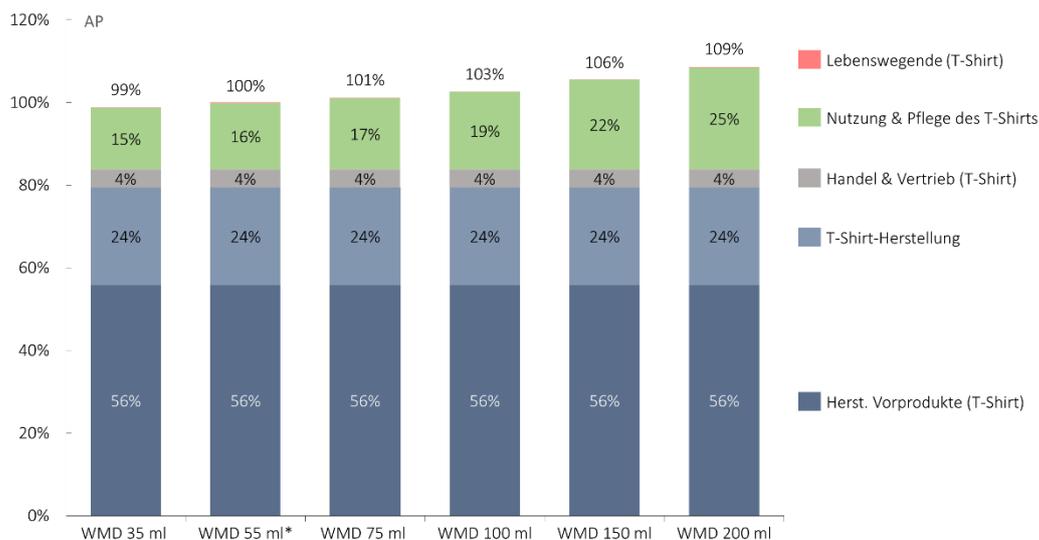


Abbildung 6-5. Versauerungspotenzial (AP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmitteldosierung (WMD: 35 bis 200 ml). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1 % zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (Einsatz von 55 ml Waschmittel pro Waschgang für 3.5 kg Wäsche, vgl. Kapitel 4.2).

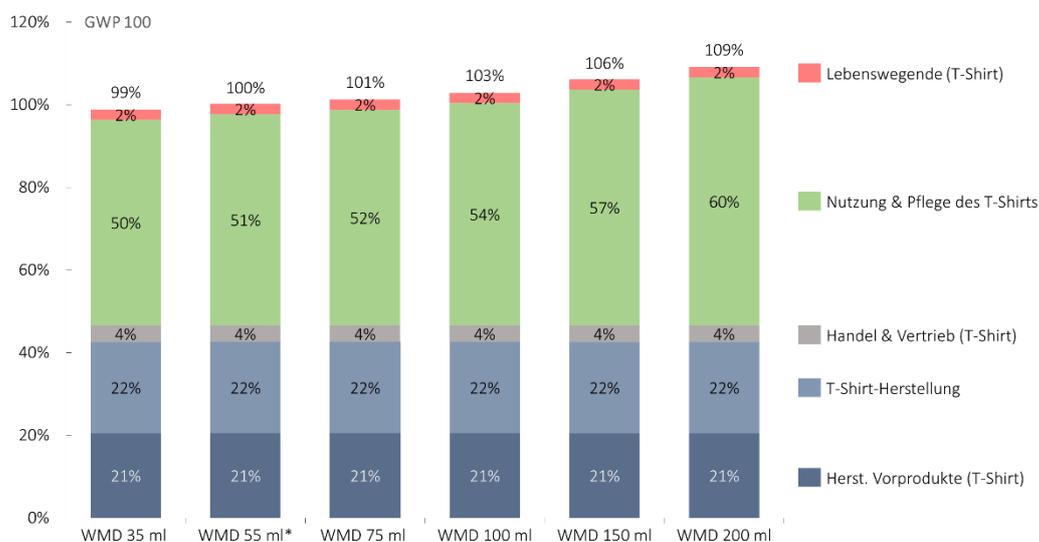


Abbildung 6-6. Treibhauspotenzial (GWP 100) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmitteldosierung (WMD: 35 bis 200 ml). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1 % zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (Einsatz von 55 ml Waschmittel pro Waschgang für 3.5 kg Wäsche, vgl. Kapitel 4.2).

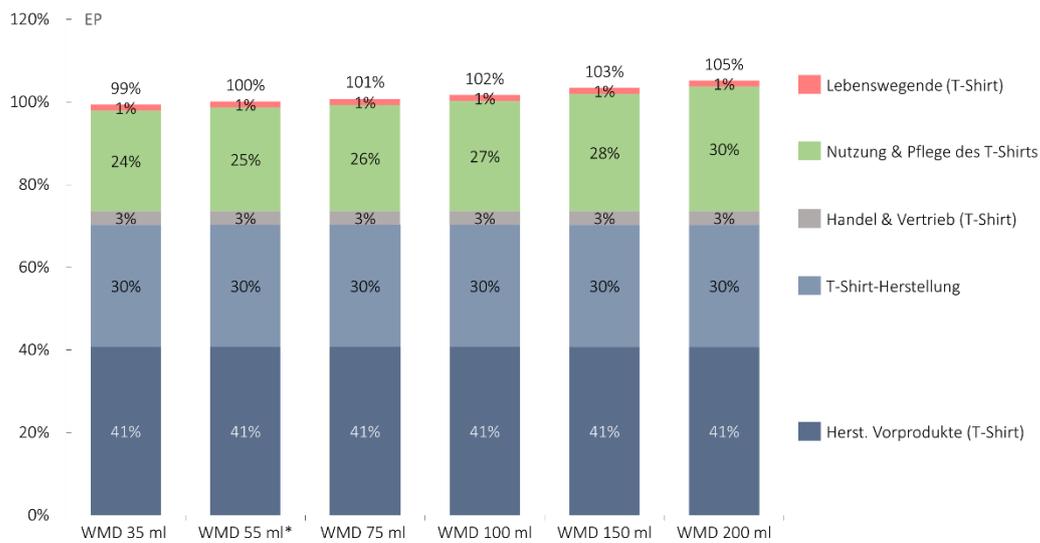


Abbildung 6-7. Eutrophierung, terrestrisch (EP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmitteldosierung (WMD: 35 bis 200 ml). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1 % zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (Einsatz von 55 ml Waschmittel pro Waschgang für 3.5 kg Wäsche, vgl. Kapitel 4.2).

6.2.3. Waschmaschinenbeladung

Erwartungsgemäß ging eine höhere Beladung der Waschmaschine mit einer Reduzierung der auf das T-Shirt bezogenen Umweltwirkungen einher. Der Einfluss der Beladung der Waschmaschine auf die Umweltwirkungen zeigte sich besonders deutlich in den Ergebnissen der Wirkungskategorien ADP, GWP und WDP (Abbildung 6-8 bis Abbildung 6-10).

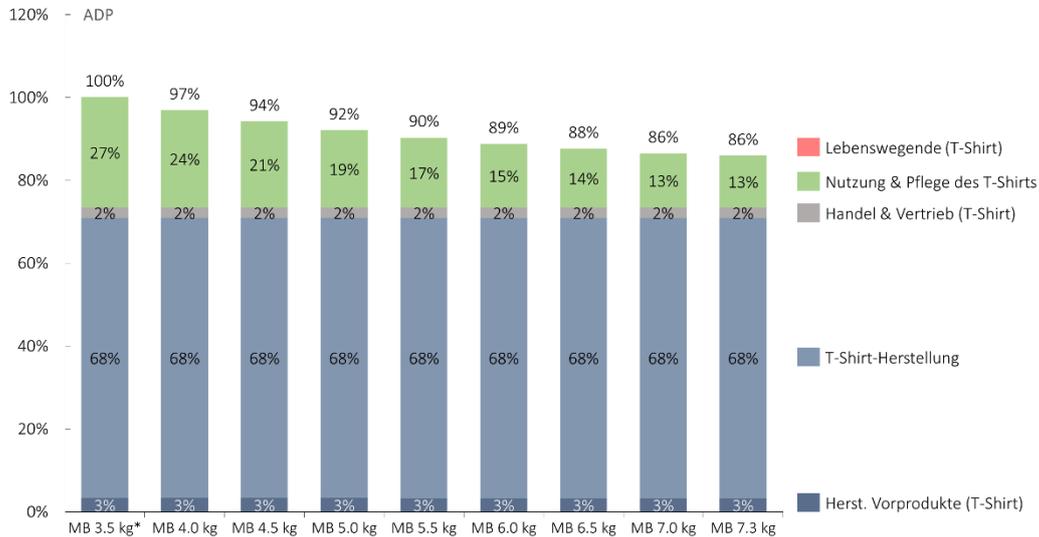


Abbildung 6-8. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmaschinenbeladung (MB: 3.5 bis 7.3 kg). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1 % zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (durchschnittliche Beladung von 3.5 kg Wäsche pro Waschgang, vgl. Kapitel 4.2).

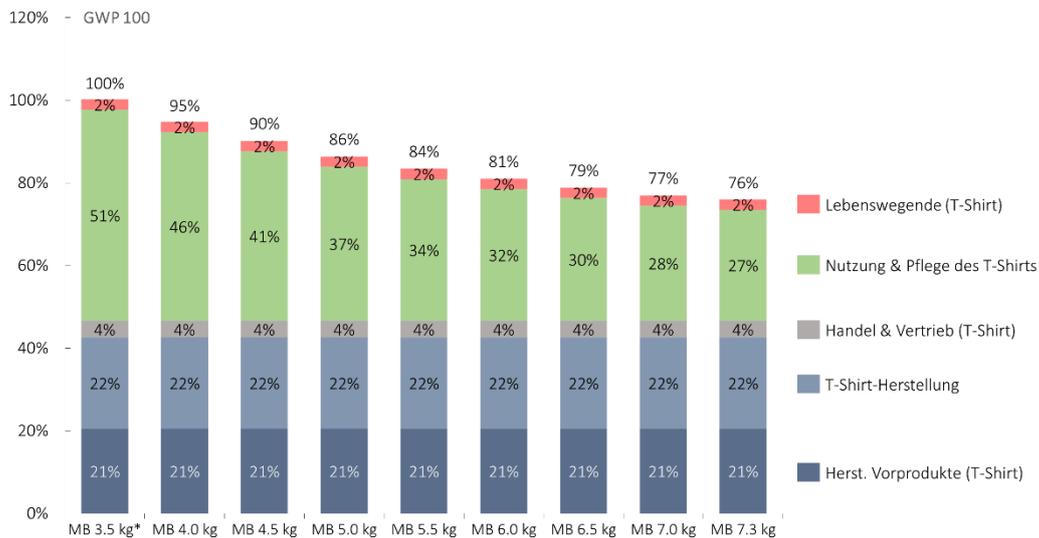


Abbildung 6-9. Treibhauspotenzial (GWP 100) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmaschinenbeladung (MB: 3.5 bis 7.3 kg). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1 % zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (durchschnittliche Beladung von 3.5 kg Wäsche pro Waschgang, vgl. Kapitel 4.2).

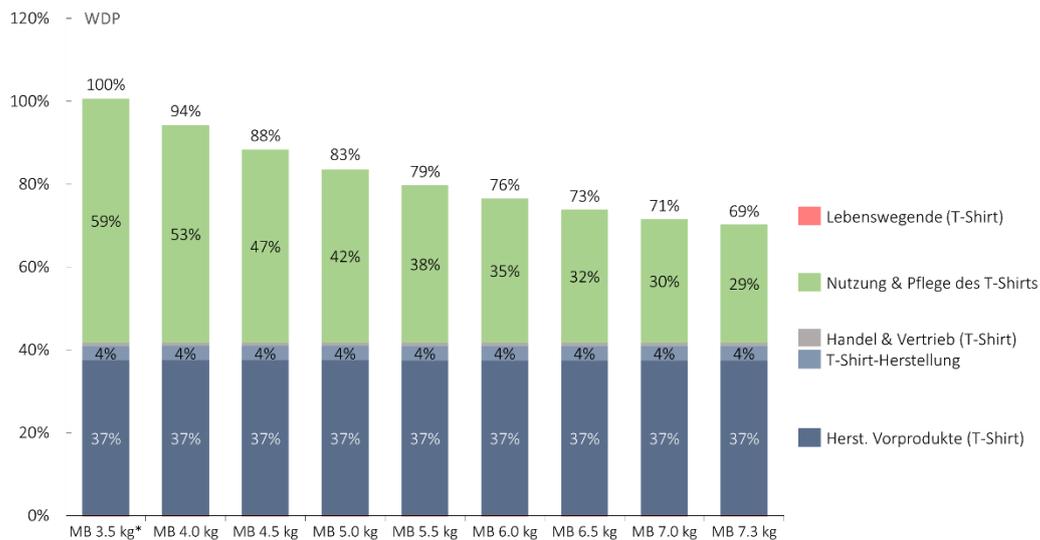


Abbildung 6-10. Ressourcenverbrauch Wasser (WDP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschmaschinenbeladung (MB: 3.5 bis 7.3 kg). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1 % zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (durchschnittliche Beladung von 3.5 kg Wäsche pro Waschgang, vgl. Kapitel 4.2).

6.2.4. Waschhäufigkeit

Das vermehrte Waschen eines T-Shirts erhöht dessen lebenswegbezogene Umweltwirkungen deutlich. Unterschiede bei der Waschhäufigkeit spiegeln sich ebenfalls vor allem in den Ergebnissen der Wirkungskategorien ADP, GWP und WDP (Abbildung 6-11 bis Abbildung 6-13) wider, wobei der lineare Zusammenhang zwischen Waschhäufigkeit und Umweltwirkungen deutlich hervortritt.

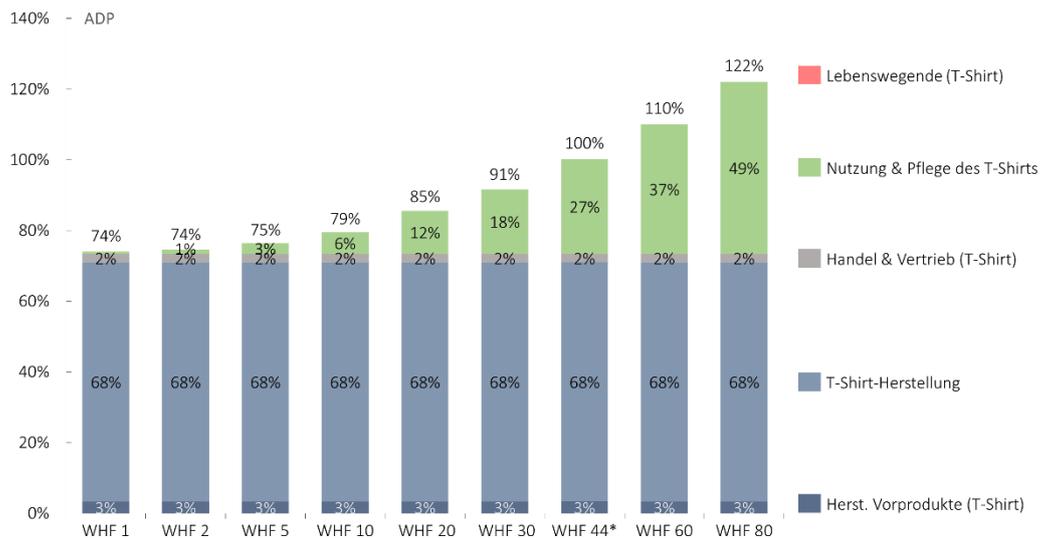


Abbildung 6-11. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschhäufigkeit (WHF: 1- bis 80-maliges Waschen). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1% zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (44-maliges Waschen und Trocknen des T-Shirts, vgl. Kapitel 4.2).

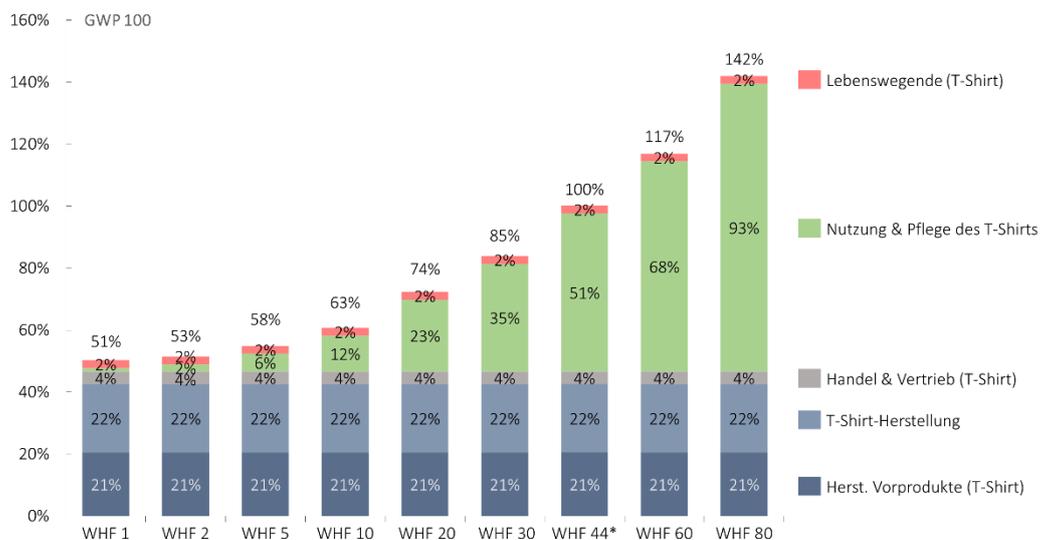


Abbildung 6-12. Treibhauspotenzial (GWP 100) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschhäufigkeit (WHF: 1- bis 80-maliges Waschen). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1 % zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (44-maliges Waschen und Trocknen des T-Shirts, vgl. Kapitel 4.2).

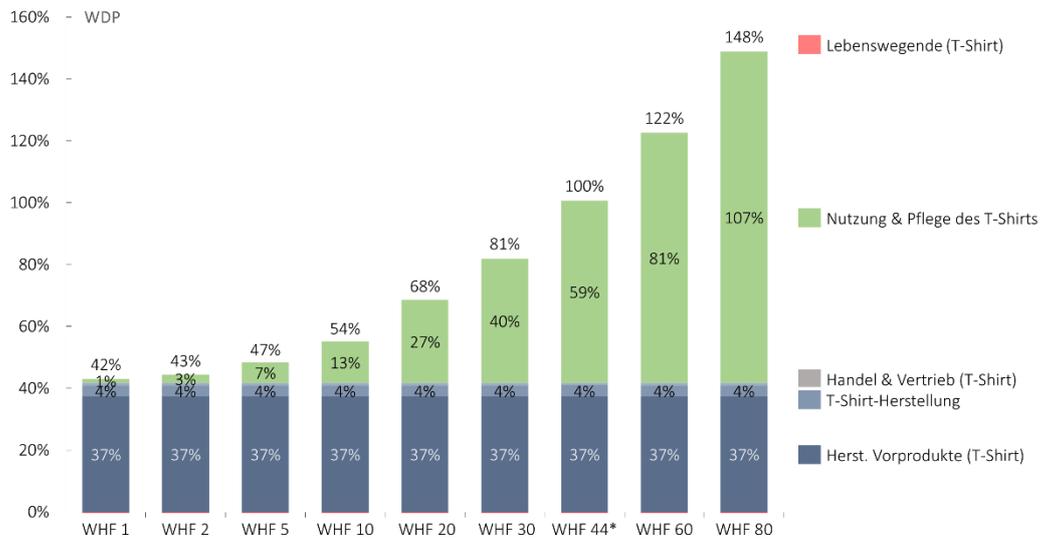


Abbildung 6-13. Ressourcenverbrauch Wasser (WDP) eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts bei veränderter Waschhäufigkeit (WHF: 1- bis 80-maliges Waschen). Die abgeschätzten Umweltwirkungen und deren Aufschlüsselung nach Lebenswegphasen werden relativ zur Ausgangslage dargestellt. Lebenswegphasen die weniger als 1 % zu den Gesamtumweltwirkungen beitragen werden nicht genannt.

*Ausgangslage (44-maliges Waschen und Trocknen des T-Shirts, vgl. Kapitel 4.2).

6.3. Vollständigkeits- und Konsistenzprüfung

Für die vorliegende Ökobilanz wurden Daten zu allen, für das Produktsystem (herkömmliches weißes Baumwolle T-Shirt, das in Deutschland getragen, gewaschen und entsorgt wird) relevanten, Prozessschritten erhoben. Alle enthaltenen Stoff- und Energieströme wurden unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.4 definierten Abschneidekriterien bilanziert und abgebildet. Alle Materialströme wurden vollständig erfasst und über die beschriebenen Prozessschritte verfolgt. Für das Vordergrundsystem (Nutzung und Pflege des T-Shirts) ist die Datenlage als gut zu betrachten, da sich die zugehörigen Teilprozesse zum Teil auf Primärdaten stützen. Alle Daten wurden bis zur Ressourcenentnahme modelliert, und es wurden keine relevanten Basisprozessdaten abgeschnitten. Die Repräsentativität der Daten wurde anhand von GaBi-Datenbank-Prozessen (GaBi 8.7) und in Rücksprache mit Experten aus der Waschmittel-, Textil- und Bekleidungsindustrie bestätigt.

Die zugrunde liegenden Daten zur Energieerzeugung entstammen der Datenbank der GaBi-Bilanzierungssoftware. Sie bilden den repräsentativen Stand der Technik unter Berücksichtigung der geografischen und zeitlichen Lage ab. Die Konsistenz der eingesetzten Daten wird durch die zugrunde liegende Vorgehensweise sowie die Verwendung von Sekundärdaten aus wissenschaftlich fundierten Studien und Primärdaten sichergestellt. Darüber hinaus stellt die ausführliche Ergebnisanalyse sicher, dass im Prozessgerüst keine Fehler bei ergebnisrelevanten Prozessschritten vorliegen.

6.4. Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Bezogen auf die Zielstellung der Studie (Kapitel 2.1) können folgende Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen ausgesprochen werden.

Die lebenszyklusbasierten Umweltwirkungen eines weißen Baumwolle T-Shirts werden maßgeblich durch die Produktion der Baumwolle und die Teilprozesse der T-Shirt-Herstellung bestimmt. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen vergleichbarer Studien (Jewell et al., 2017; PEFCR, 2017; Zhang et al., 2015).

Die Umweltwirkungen der Nutzung und Pflege des T-Shirts – welchen in dieser Studie das Hauptaugenmerk galt – wurden besonders durch die Wäschepflege beeinflusst. Mit Ausnahme der Indikatoren Ökotoxpotenzial Frischwasser (FAETP) und Landnutzung (LU), zeigte das Waschen und maschinelle Trocknen in allen Wirkungskategorien einen deutlichen Anteil an den Gesamtumweltwirkungen, wenn auch – insbesondere für MAETP, ADP, AP, und EP – deutlich geringer als der Anteil der Module A und B (Herstellung der Vorprodukte und T-Shirt-Herstellung). Der Prozess des Trocknens leistet unter der Annahme, dass nur 10 % der Wäsche in einem Wäschetrockner getrocknet wird, einen nur geringen Anteil an den Gesamtumweltwirkungen. Bei einer Erhöhung des Anteils der Wäsche, die in einem Wäschetrockner getrocknet wird, steigen die Umweltwirkungen für die Nutzung und Pflege des T-Shirts allerdings erheblich an. So wäre etwa der elementare Ressourcenverbrauch (ADP) eines

T-Shirts, dessen Trocknung ausschließlich maschinell erfolgt, in etwa doppelt so hoch wie der eines T-Shirts, das zu 100 % im Freien an der Luft getrocknet würde.

Das 44-malige Waschen verantwortet etwa 50 % des berechneten Treibhauspotenzials (GWP) und Ressourcenverbrauchs, Wasser (WDP) und trägt immerhin noch 15–24 % zum Versauerungspotenzial (AP), Terrestrischen Eutrophierungspotenzial (EP) und Ressourcenverbrauch, elementar (ADP) des T-Shirts bei. Der relativ hohe Anteil des Waschens in den Kategorien GWP, WDP und ADP ist besonders dem Stromverbrauch und der Behandlung der anfallenden Abwässer geschuldet. Auch die Waschmittelbereitstellung (Formulierung und Produktion der Waschmittelinhaltsstoffe) trägt signifikant zu den Umweltwirkungen des Wäschewaschens bei, insbesondere in den Kategorien ADP und AP.

Inwieweit Annahmen zur Wäschepflege signifikante Auswirkung auf das Gesamtergebnis haben, wurde im Rahmen einer Sensitivitätsprüfung untersucht. Die Umweltwirkungen steigen erwartungsgemäß in allen Umweltkategorien mit zunehmender Waschttemperatur, Waschmitteldosierung und Waschkhäufigkeit sowie abnehmender Beladung der Waschmaschine.

Unter Umweltgesichtspunkten kann die Wahl niedrigerer Waschttemperaturen für private Haushalte empfohlen werden. Dabei muss allerdings gewährleistet sein, dass auch bei niedrigen Waschttemperaturen eine gute Waschleistung (Reinheitsgrad) und Hygiene erreicht werden, da ansonsten ein wiederholtes Waschen erforderlich wäre (was wiederum zu erhöhten Umweltwirkungen führen würde).

Wie die Sensitivitätsprüfung zeigt, lassen sich weitere Einsparungen der Umweltwirkungen durch eine optimierte Beladung der Waschmaschine erzielen. Neben der besseren Reinigungsleistung voll beladener Waschmaschinen ließe sich hierdurch insbesondere der spezifische Strom- und Wasserverbrauch pro T-Shirt verringern. Um bei möglichst geringer Umweltbelastung optimale Waschergebnisse zu erhalten, sollte zudem auf die Einhaltung der waschmittelspezifischen Dosierempfehlungen geachtet werden.

Zudem zeigt die Sensitivitätsprüfung zur Wäschetrocknung in privaten Haushalten, dass ein niedriger Anteil (oder auch der Verzicht) der Trocknung in einem Wäschetrockner erhebliche Einsparungen bei den Umweltwirkungen zur Folge hat.

7. Referenzen

- Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M., Fischer, M., 2013. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *Build. Environ.* 60, 81–92. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009>
- European Commission, 2018a. Product Environmental Footprint Category Rules Guidance - Version 6.3. Brussels, Belgium.
- European Commission, 2018b. Results and Deliverables of the Environmental Footprint Pilot Phase, Online.
- European Commission, 2015. Guidance for the implementation of the EU Product environmental Footprint (PEF) during the Environmental Footprint (EF) pilot phase – version 5.0 – August 2015.
- GaBi 8.7, 2018. Software und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung.
- Golsteijn, L., Menkveld, R., King, H., Schneider, C., Schowanek, D., Nissen, S., 2015. A compilation of life cycle studies for six household detergent product categories in Europe: the basis for product-specific A.I.S.E. Charter Advanced Sustainability Profiles. *Environ. Sci. Eur.* 27, 1–12. doi:[10.1186/s12302-015-0055-4](https://doi.org/10.1186/s12302-015-0055-4)
- Gwozdz, W., Nielsen, K.S., Müller, T., 2017. An environmental perspective on clothing consumption: Consumer segments and their behavioral patterns. *Sustain.* 9, 762. doi:[10.3390/su9050762](https://doi.org/10.3390/su9050762)
- IKW, 2017. Bericht Nachhaltigkeit in der Wasch-, Pflege- und Reinigungsmittelbranche in Deutschland 2015-2016. Frankfurt am Main, Germany. doi:[10.1007/978-3-8349-3746-9](https://doi.org/10.1007/978-3-8349-3746-9)
- ISO, 2006a. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. ISO 14040.
- ISO, 2006b. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. ISO 14044.
- Jewell, J., Koffler, C., Murphy, S., 2017. LCA Update of Cotton Fiber and Fabric Life Cycle Inventory. Report version: 1.0. Leinfelden-Echterdingen, Germany.
- JRC, 2010. ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- KBA, 2013. Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2013 [WWW Document]. Kraftfahrt-Bundesamt. URL https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz.html (accessed 10.1.18).
- Kruschwitz, A., Karle, A., Schmitz, A., Stamminger, R., 2014. Consumer laundry practices in Germany. *Int. J. Consum. Stud.* 38, 265–277. doi:[10.1111/ijcs.12091](https://doi.org/10.1111/ijcs.12091)
- Leiden University, 2012. CML-IA - Characterisation factors [WWW Document]. URL <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors> (accessed 9.11.18).
- PEFCR, 2017. Product Environmental Footprint (PEF) Category Rules (PEFCR) Pilot. First draft of the T-shirts PEFCR in the context of the EU Product Environmental Footprint Category Rules Pilots.
- PEFCR, 2015a. PEF screening report in the context of the EU Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) Pilots. Household Heavy Duty Liquid Laundry Detergents (HDLLD)

for machine wash.

PEFCR, 2015b. PEF screening report in the context of the EU Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) Pilots. T-shirts.

Statistisches Bundesamt, 2017. Aufkommen, Beseitigung und Verwertung von Abfällen im Jahr 2015 in Tausend Tonnen. Wiesbaden.

StiWa, 2017. Haushalt und Garten. Waschmaschinen. Trommelwirbel. test 64–67.

Yamaguchi, Y., Seii, E., Itagaki, M., Nagayama, M., 2011. Evaluation of domestic washing in Japan using life cycle assessment (LCA). *Int. J. Consum. Stud.* 35, 243–253. doi:10.1111/j.1470-6431.2010.00975.x

Yuan, Z., Zhang, Y., Liu, X., 2016. Life cycle assessment of horizontal-axis washing machines in China. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 15–28. doi:10.1007/s11367-015-0993-5

Zhang, Y., Liu, X., Xiao, R., Yuan, Z., 2015. Life cycle assessment of cotton T-shirts in China. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 994–1004. doi:10.1007/s11367-015-0889-4

8. Anhang

Anhang A

Critical Review des Berichtes “ Ökobilanzielle Bewertung des Lebensweges eines handelsüblichen weißen Baumwolle T-Shirts in Deutschland“

Beauftragt von:	Prof. Dr. Matthias Finkbeiner, Dr. Annetrin Lehmann, Martin Rofeis, Sustainable Engineering, Technische Universität Berlin, Deutschland
Reviewer:	Dr. Martin Baitz, thinkstep AG, Leinfelden-Echterdingen, Deutschland
Normbezug:	ISO 14040 (2006): Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework ISO 14044 (2006): Environmental Management - Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines ISO/TS 14071:2014: Environmental management – Life cycle assessment – Critical review processes and reviewer competencies: Additional requirements and guidelines to ISO 14044:2006

Umfang des Critical Review

Diese Studie soll ev. der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden, enthält jedoch keine vergleichenden Behauptungen, die die Vorteilhaftigkeit einer gewissen Variante zum Nachteil einer anderen herausstellen. Daher wird die Studie einer kritischen Prüfung durch einen externen Sachverständigen nach DIN EN ISO 14044 Kapitel 6.2 unterzogen.

Der Sachverständige hatte die Aufgabe in zwei Schritten – zunächst Ziel und Untersuchungsrahmen und später den Gesamtbericht – also teilweise studienbegleitend wie teilweise ex post zu prüfen, ob ...

- die angewendeten Ökobilanz-Methoden in Einklang mit den internationalen Standards ISO 14040, 14044 und der technischen Spezifikation ISO/TS 14071 stehen
- die angewendeten Ökobilanz-Methoden wissenschaftlich und technisch zulässig sind,
- die verwendeten Informationen und Daten mit Blick auf das Ziel und den Untersuchungsrahmen der Studie angemessen sind,
- die Ergebnisinterpretation die in Ziel und Untersuchungsrahmen identifizierten Aspekte und Einschränkungen reflektiert, und
- der Bericht der Studie transparent und konsistent ist.

Dieses Review ist für den vorgelegten Bericht der Version von 14.02.2019 gültig. Die spezifische Analyse und Verifikation individueller durch die Autoren erstellten Datensätze, ist nicht per se Umfang eines solchen Reviews, wurde jedoch zusätzlich durch Abgleich mit anderen LCA Informationen durchgeführt. Es wurden besonders ergebnisrelevante

Datensätze oder Hintergrunddatensätze hinterfragt und mit alternativen Informationen abgeglichen.

Review Prozess

Der Prozess wurde zwischen Sustainable Engineering, Technische Universität Berlin (Ersteller des Berichts) und dem Sachverständigen koordiniert. Das Prüfungsverfahren wurde nach Vorlage des ersten Entwurfes des Ziels und Untersuchungsrahmen am 14.09.2018 begonnen. Der Sachverständige hatte Ziel und Untersuchungsrahmen des Berichtes umfassend analysiert und ca. 20 Hinweise gegeben, die alle bestens erklärt oder umgesetzt wurden. Daraufhin wurde am 18.01.2019 ein erster Entwurf des Abschlussberichtes an den Sachverständigen versandt. Nach positiver Prüfung oder Umsetzung der ca. 20 Hinweise im Ziel und Untersuchungsrahmen wurden in einer zweiten Runde weitere ca. 55 Hinweise genereller, technischer und redaktioneller Art vom Sachverständigen angemerkt, die dem Auftraggeber am 04.02.2019 übermittelt wurden. Einige Punkte wurden in Email Diskussionen geklärt und dem Sachverständigen sehr konstruktiv erläutert.

Am 12.02.2019 wurde die finale Berichtversion an den Sachverständigen übersandt und alle kritischen Hinweise und nahezu alle Empfehlungen des Sachverständigen wurden in konstruktiver und umfassender Weise berücksichtigt.

Die Umsetzung der vereinbarten Maßnahmen und der Kommentare wurde geprüft und es waren keine weiteren Hinweise oder Kommentare notwendig.

Positiv hervorzuheben sind insbesondere die guten Daten. Einerseits, die von der TU Berlin erhobenen und gut dokumentierten Primärdaten, die selbst erstellten Daten mit den transparenten und nachvollziehbaren Berechnungen, sowie die Verwendung aktueller Hintergrunddaten. Neben der Konformität der Ökobilanz bezüglich angewandeter Normen ist somit auch die Repräsentativität von Herstellungs-, Import- und Nutzungsaspekten herauszustellen. Die überwiegend mit sehr guten erhobenen und errechneten Vordergrund-Daten und entsprechend aktuellen Hintergrunddaten modellierten Systeme, mussten nur an wenigen Stellen mit entsprechendem technischen Know-how konservativ abgeschätzt werden um Restdatenlücken zu füllen. Somit konnte vermieden werden, dass datenseitige Abschneidekriterien angewendet werden mussten. Die Gefahr eines ungewollten sogenannten „Greenwashings“ konnte somit definitiv vermieden werden.

Die sehr transparente und klare Gestaltung der Szenarien mit technisch klaren Aussagen konnte daher eine umfassende kritische Begutachtung der Arbeit aus Norm-, Daten- und Lebenszyklusdaten-Sicht im Review-Prozess gewährleisten.

Der Sachverständige bedankt sich für den uneingeschränkten Zugang und die sachgerechte Beantwortung aller nachgefragten Informationen, sowie die offene und konstruktive Art der Autoren während des Prüfungsverfahrens.

Bewertung

Die Studie umfasst die Analyse des Lebenswegs eines in unterschiedlichen Ländern hergestellten, in Deutschland importierten, genutzten und entsorgten handelsüblichen weißen Baumwolle T-Shirts.

Die Studie wurde professionell und dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik entsprechend durchgeführt. Es wurde nicht nur die Nutzungsphase des T-Shirts, sondern auch die Herstellungsphase, Import- und Handelsprozesse des T-Shirts und dessen Entsorgung modelliert, um dann aufgrund der quantifizierbaren Relevanz der Nutzungsphase durch entsprechende Waschprozesse hier zielgerichtet sehr detaillierte Szenarien zu modellieren.

Als vorbildlich und herausragend ist zu erwähnen, dass zur Absicherung der getroffenen Annahmen und Ergänzung der Datengrundlage ein Begleitkreis aus Vertretern von Prüfinstituten, Wissenschaft und Industrieverbänden eingerichtet wurde, was den Szenarien und Ergebnissen herausragende Relevanz und Qualität bescheinigt.

Die Ergebnisse sind übersichtlich und transparent dargestellt und bestens strukturiert. Somit war für den Sachverständigen gut nachvollziehbar was die Autoren berechnet und konkludiert haben.

Massen- und Energiebilanzen waren, soweit nachvollziehbar, gut geschlossen und die Prozesse gut dokumentiert. Die Teil-Ergebnisse wurden mit relevanten und aktuellen Informationen weiterer Quellen abgeglichen und bestätigt.

Ergebnisbeiträge sind transparent nachvollziehbar von Lebenszyklusphasen über einzelne Prozesse bis teilweise auf Emissionen runtergebrochen.

Die Auswahl der Wirkungskategorien ist breit und mehr als ausreichend um die Aussagen der Studie zu untermauern.

Das erstellte Ökobilanzmodell repräsentiert in geeigneter Weise den Untersuchungsgegenstand. Da das Modell in einer Ökobilanz-Software mit entsprechender Datenbank erstellt wurde ist – bei entsprechender Archivierung - jederzeit eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse möglich.

Hervorzuheben ist zudem die Verwendung spezifischer Primärdaten der Nutzung und die detaillierten Modelle der Herstellung.

Im Rahmen dieser Studie wurden, soweit der Sachverständige dies einschätzen konnte, alle Rohstoffe und Vorprodukte zur Herstellung der im Vordergrundsystem modellierten T-Shirts einbezogen und damit war keine relevante Vernachlässigung erkennbar. Ferner wurden alle nutzungsrelevanten Parameter sinnvoll einbezogen.

Die Interpretation der Ergebnisse ist klar, deutlich und übersichtlich. Die Interpretation ist als verantwortungsvolle Darstellung mit klaren Aussagen und Quantifizierungen zu den Sensitivitäten der Nutzungsparameter zu verstehen und gut erläutert.

Mit dieser Studie hat die TU Berlin eine verlässliche Grundlage geschaffen, um geeignete Hinweise oder Maßnahmen zur weiteren Verbesserung der Umweltperformance von Baumwolle T-Shirt-Produkten zu quantifizieren, sowie die Relevanz möglicher Maßnahmen ins Verhältnis der anderen Aspekte zu setzen.

Ergebnis

Die Ökobilanz wurde in Übereinstimmung mit ISO 14040 und ISO 14044 erstellt. Die verwendeten Methoden und die sachkundige Modellierung der Produktsysteme sind von hoher Qualität. Sie sind geeignet, die in der Studie formulierten Ziele zu erfüllen. Der Bericht ist umfassend und beschreibt den Untersuchungsrahmen der Studie in transparenter Weise. Die erarbeiteten Ergebnisse und Folgerungen können gut nachvollzogen werden und dürfen daher als qualitativ sehr gut gelten.

Stuttgart, den 26.02.2019



Dr. Martin Baitz

Anhang B

Tabelle A-1. Emissionen im Teilprozess B.02 (Aufbereiten und Bleichen des gestrickten Single Jersey).

Emissionen	Menge*	Einheit	DQ**
Adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX) [Eintrag ins Frischwasser]	1.41E-06	kg	[1]
Ammoniak [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	7.45E-07	kg	[1]
Arsen [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	2.45E-07	kg	[1]
Biologischer Sauerstoffbedarf (BOD) [Eintrag ins Frischwasser]	1.46E-04	kg	[1]
Cadmium [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	2.45E-06	kg	[1]
Chemischer Sauerstoffbedarf (COD) [Eintrag ins Frischwasser]	7.76E-04	kg	[1]
Chlor, gelöst [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	1.23E-06	kg	[1]
Chrom [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	2.67E-06	kg	[1]
Chrom (+VI) [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	1.23E-07	kg	[1]
Kupfer [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	3.83E-06	kg	[1]
Zyanid [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	2.45E-07	kg	[1]
Fluor [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	2.45E-06	kg	[1]
Eisen [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	3.68E-06	kg	[1]
Blei [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	1.23E-07	kg	[1]
Mangan [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	2.45E-06	kg	[1]
Quecksilber [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	1.23E-08	kg	[1]
Nickel [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	3.72E-06	kg	[1]
Nitrat [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	1.23E-05	kg	[1]
Stickstoff (Total N) [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	9.66E-05	kg	[1]
Öl (generisch) [Eintrag Kohlenwasserstoffe ins Frischwasser]	2.20E-05	kg	[1]
Phenol (hydroxy benzene) [Eintrag Kohlenwasserstoffe ins Frischwasser]	1.23E-06	kg	[1]
Phosphor [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	1.02E-05	kg	[1]
Selen [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	6.12E-08	kg	[1]
Feststoffe, gelöst [Partikeleintrag ins Frischwasser]	2.49E-03	kg	[1]
Feststoffe, schwebend [Partikeleintrag ins Frischwasser]	1.61E-04	kg	[1]
Schwefligsaures Salz [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	2.45E-06	kg	[1]
Organisch gebundener Gesamtkohlenstoff (TOC) [Eintrag ins Frischwasser]	5.05E-05	kg	[1]
Vanadium [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	2.45E-07	kg	[1]
Zink [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	6.27E-06	kg	[1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: [1] - (Jewell et al., 2017).

Tabelle A-2. Emissionen im Teilprozess B.03 (Finishing und Krumpfen).

Emissionen	Menge*	Einheit	DQ**
Adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX) [Eintrag ins Frischwasser]	8.17E-08	kg	[1]
Ammoniak [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	2.12E-07	kg	[1]
Arsen [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	2.95E-07	kg	[1]
Biologischer Sauerstoffbedarf (BOD) [Eintrag ins Frischwasser]	4.38E-05	kg	[1]
Cadmium [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	2.95E-06	kg	[1]
Chemischer Sauerstoffbedarf (COD) [Eintrag ins Frischwasser]	2.85E-04	kg	[1]
Chlor, gelöst [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	1.47E-06	kg	[1]
Chrom [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	2.96E-06	kg	[1]
Chrom (+VI) [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	1.47E-07	kg	[1]
Kupfer [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	4.43E-06	kg	[1]
Zyanid [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	2.95E-07	kg	[1]
Fluor [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	2.95E-06	kg	[1]
Eisen [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	4.41E-06	kg	[1]
Blei [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	1.47E-07	kg	[1]
Mangan [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	2.95E-06	kg	[1]
Quecksilber [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	1.47E-08	kg	[1]
Nickel [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	4.41E-06	kg	[1]
Nitrat [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	1.47E-05	kg	[1]
Stickstoff (Total N) [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	7.56E-05	kg	[1]
Öl (generisch) [Eintrag Kohlenwasserstoffe ins Frischwasser]	1.85E-05	kg	[1]
Phenol (hydroxy benzene) [Eintrag Kohlenwasserstoffe ins Frischwasser]	1.47E-06	kg	[1]
Phosphor [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	7.61E-06	kg	[1]
Selen [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	7.37E-08	kg	[1]
Feststoffe, gelöst [Partikeleintrag ins Frischwasser]	2.62E-04	kg	[1]
Feststoffe, schwebend [Partikeleintrag ins Frischwasser]	1.61E-04	kg	[1]
Schwefligsaures Salz [anorganische Emissionen ins Frischwasser]	2.95E-06	kg	[1]
Organisch gebundener Gesamtkohlenstoff (TOC) [Eintrag ins Frischwasser]	2.93E-06	kg	[1]
Vanadium [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	2.95E-07	kg	[1]
Zink [Eintrag Schwermetalle ins Frischwasser]	7.39E-06	kg	[1]

*Menge pro funktionelle Einheit (d. h., weißes Baumwolle T-Shirt mit einem spezifischen Gewicht von 155.85 g und einer Lebensdauer von 44 Wäschen). **Datenquelle: [1] - (Jewell et al., 2017).

Tabelle A-3. Bilanzierung der Rezeptur eines repräsentativen Flüssigwaschmittels (vgl. Tabelle 4-24). Getroffene Annahmen und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze (DB version 2018 SP36).

Stoff-/ Energieströme	bilanziert als	DQ*
Zitronensäure	...citric acid [proxy]	Tab. A-5
Natriumcitrat	DE: Sodium citrate ts	[1]
Amylasen	DE: Enzyme (estimation over glucose) ts	AP, [1]
Cellulase	DE: Enzyme (estimation over glucose) ts	AP, [1]
Mannanase	DE: Enzyme (estimation over glucose) ts	AP, [1]
Lipase	DE: Enzyme (estimation over glucose) ts	AP, [1]
Pektinasen	DE: Enzyme (estimation over glucose) ts	AP, [1]
Protease	DE: Enzyme (estimation over glucose) ts	AP, [1]
Salze der Borsäure ^a	...chemical agent [proxy]	Tab. A-4
Na-Formiat	...chemical agent [proxy]	Tab. A-4
Ethanol	DE: Ethanol ts	[1]
Farbstoffe ^b	GLO: Direct dyes ts	AP, [1]
Komplexbildner ^c	GLO: Trisodium phosphate ts	[1]
Optische Aufheller ^d	...chemical agent [proxy]	Tab. A-4
Parfümöle/Duftstoffe ^e	...fragrance [proxy]	Tab. A-6
Phosphonate	GLO: Soaping agent (phosphonic acid and foam stabilizers) ts	AP, [1]
Polycarboxylate	GLO: Soaping agent (sodium polycarboxylate) ts	AP, [1]
Silikon	...chemical, inorganic [proxy]	AP, [1]
Anion. Tenside (FAES) ^f	GLO: Non-ionic surfactant (ethylene oxid dervatives) ts	AP, [1]
Anion. Tenside (LAS) ^g	EU-28: C10-13 Linear alkylbenzene sulphonic acid (HLAS) ERASM	AP, [1]
Seife	GLO: Non-ionic surfactant (fatty acid derivate) ts	AP, [1]
Nichtion. Tenside (FAEO) ^h	EU-28: C16-18 Alcohol (oleo) Ethoxylate, >20 moles EO ERASM	AP, [1]
Amphotere Tenside	EU-28: C8-18 Alkyl amidopropyl betaine (oleo based) ERASM	AP, [1]
Glyzerine	EU-28: Glycerine (refined) by-product rapeseed methyl ester ts	[1]
Propylenglykol	DE: Propylene glycol ts	[1]
Konservierungsstoffe	...chemical agent [proxy]	Tab. A-4
Styrene/Acrylates Copolym.	GLO: Soaping agent (acrylic polymer) ts	AP, [1]
Natriumchlorid	EU-28: Sodium chloride (rock salt) ts	[1]
Sodium Cumenesulfonate	EU-28: Sodium cumene sulphonate (No. 30 - Matrix) ERASM	[1]
Wasser, destilliert	EU-28: Water (desalinated; deionised) ts	[1]

*Datenquelle: AP – Approximation | [1] - (GaBi 8.7, 2018).

^a und andere Borverbindungen. ^b Farbstoffe und Pigmente. ^c biologisch schnell abbaubar (GLDA, MGDA). ^d fluoreszierende Weißmacher. ^e einschließlich Lösungsmittel und Beistoffe. ^f Anionische Tenside als Fettalkoholethersulfate (FAES). ^g Anionische Tenside als Dodecylbenzolsulfonate (LAS). ^h Nichtionische Tenside als Fettalkoholethoxylat (FAEO) auch Laurylaminoxid.

Tabelle A-4. Approximation einer generischen Chemikalie (...chemical agent [proxy]) in GaBi 8.7 (DB version 2018 SP36). Veranschlagte Stoff-/ Energieströme und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze (vgl. Tabelle A-3).

Bezug	Prozess*	Flow	Menge**	Einheit
Input	GLO: Acid dye ts	Acid dye	4.00E-02	kg
	GLO: Antifermentative agent ts	AfA ^d	4.00E-02	kg
	GLO: Antifoaming agent (ethoxylate fatty alcohols) ts	Antifoaming ag. ^a	2.00E-02	kg
	GLO: Antifoaming agent (siliconic emulsion) ts	Antifoaming ag. ^a	2.00E-02	kg
	GLO: Antireducing agent (acrylic polymer sodic salt) ts	Antireducing ag. ^a	4.00E-02	kg
	GLO: Azoic dye (chromium complex azoic dyestuff) ts	Azoic dye	4.00E-02	kg
	GLO: Cationic dye ts	Cationic dye	4.00E-02	kg
	GLO: Detergent (fatty acid sulphonate derivate) ts	Detergent	4.00E-02	kg
	GLO: Direct dyes ts	Direct dye	4.00E-02	kg
	GLO: Disperse dyes ts	Disperse dye	4.00E-02	kg
	GLO: Dispersing agent (anionic dispersant and ethoxylate non ionic mixture) ts	Dispersing ag. ^a	1.00E-02	kg
	GLO: Dispersing agent (ethoxylate fatty alcohols) ts	Dispersing ag. ^a	1.00E-02	kg
	GLO: Dispersion agent (mixture of phosphate with polyacrylate) ts	Dispersing ag. ^a	1.00E-02	kg
	GLO: Dispersing agent (unspecific) ts	Dispersing ag. ^a	1.00E-02	kg
	GLO: Equalizing agent (ethoxylate amines and benzenesulphonic acid salts) ts	Equalizing ag. ^a	1.33E-02	kg
	GLO: Equalizing agent (on basis alcohol ethoxylate) ts	Equalizing ag. ^a	1.33E-02	kg
	GLO: Equalizing agent (on basis fatty amines and ethoxylates) ts	Equalizing ag. ^a	1.33E-02	kg
	GLO: Lubricant (aqueous emulsion of fatty substances) ts	Lubricant	4.00E-02	kg
	GLO: Non-ionic surfactant (ethylene oxid derivatives) ts	NiS ^b	1.00E-02	kg
	GLO: Non-ionic surfactant (fatty acid derivate) ts	NiS ^b	1.00E-02	kg
	GLO: pH buffer (ammonium tartrate) ts	pH buffers	1.00E-02	kg
	GLO: pH buffer (lactic acid based) ts	pH buffers	1.00E-02	kg
	GLO: Antistatic agent (quaternary ammonium compound) ts	QAC ^c	4.00E-02	kg
	GLO: Reactive dyes ts	Reactive dye	4.00E-02	kg
	GLO: Reducing agent (detergent and sulfoxilate) ts	Reducing agent	4.00E-02	kg
	GLO: Sequestering agent ts	Sequestering ag. ^a	4.00E-02	kg
	GLO: Soaping agent (acrylic polymer) ts	Soaping ag. ^a	5.71E-03	kg
	GLO: Soaping agent (alkyl-amino-polyglycolic compound) ts	Soaping ag. ^a	5.71E-03	kg
	GLO: Soaping agent (fatty etholxylate amines solution) ts	Soaping ag. ^a	5.71E-03	kg
	GLO: Soaping agent (phosphonic acid and foam stabilizers) ts	Soaping ag. ^a	5.71E-03	kg
	GLO: Soaping agent (quaternary ammonium compound solution) ts	Soaping ag. ^a	5.71E-03	kg
	GLO: Soaping agent (sodium alkyl-benzenesulphonate) ts	Soaping ag. ^a	5.71E-03	kg
	GLO: Soaping agent (sodium polycarboxylate) ts	Soaping ag. ^a	5.71E-03	kg
GLO: Sodium dithionite ts	Sodium dithionite	4.00E-02	kg	
GLO: Softener (fatty acids amino compounds) ts	Softener	4.00E-02	kg	
GLO: Solubilizing agent ts	Solubilizing ag. ^a	4.00E-02	kg	
GLO: Stabilising agent ts	Stabilizing ag. ^a	4.00E-02	kg	
GLO: Thickening agent (polysaccharides derivate) ts	Thickening ag. ^a	4.00E-02	kg	
GLO: Trisodium phosphate ts	TsP ^e	4.00E-02	kg	
GLO: Water repellent agent ts	Water repellent ag. ^a	4.00E-02	kg	
Output	...chemical agent [proxy]	Chemical ag. ^a	1.00E+00	kg

*Prozessdatensätze entsprechend GaBi 8.7 (DB version 2018 SP36). **Menge pro 1 kg generische Chemikalie (Chemical agent).

^a Agent. ^b Non-ionic surfactant. ^c Quaternary ammonium compound. ^d Antifermentative agent. ^e Trisodium phosphate.

Tabelle A-5. Approximation von Zitronensäure (...citric acid [proxy]) in GaBi 8.7 (DB version 2018 SP36). Veranschlagte Stoff-/ Energieströme und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze (vgl. Tabelle A-3).

Bezug	Prozess*	Flow	Menge**	Einheit
Input	GLO: pH buffer (ammonium tartrate) ts	pH buffers	5.00E-01	kg
	GLO: pH buffer (lactic acid based) ts	pH buffers	5.00E-01	kg
Output	...citric acid [proxy]	Citric acid	1.00E+00	kg

*Prozessdatensätze entsprechend GaBi 8.7 (DB version 2018 SP36). **Menge pro 1 kg Zitronensäure (Citric acid).

Tabelle A-6. Approximation von Duftstoffen (...fragrance [proxy]) in GaBi 8.7 (DB version 2018 SP36). Veranschlagte Stoff-/ Energieströme und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze (vgl. Tabelle A-3).

Bezug	Prozess*	Flow	Menge**	Einheit
Input	DE: Benzoic acid (from toluene) ts	Benzoic acid	5.00E-01	kg
	EU-28: Limonene (from orange juice production) ts	Limonene	5.00E-01	kg
Output	...fragrance [proxy]	Fragrance	1.00E+00	kg

*Prozessdatensätze entsprechend GaBi 8.7 (DB version 2018 SP36). **Menge pro 1 kg Duftstoff (Fragrance).

Tabelle A-7. Bilanzierung des Prozesses der Formulierung eines repräsentativen Flüssigwaschmittels (vgl. Tabelle 4-25). Getroffene Annahmen und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze (DB version 2018 SP36).

Stoff-/ Energieströme	bilanziert als	DQ*
Prozesswasser	EU-28: Tap water ts	[1]
Waschmittelwerk	...production plant [proxy]	Tab. A-8
Elektrizität	EU-28: Electricity grid mix (average power plants) ts	[1]
Kraftliner & Papier (Karton)	EU-28: Kraft paper (EN15804 A1-A3) ts	[1]
HDPE ^a (Flasche & Dose)	EU-28: Polyethylene (HDPE/PE-HD) - fabric ts	[1]
PP ^b (Deckel & Dosierkappe)	DE: Polypropylene granulate (PP) mix ts	AP, [1]
LDPE ^c (Folie & Tüten)	EU-28: LDPE Granulate (LLDPE/PE-LLD) ts	AP, [1]
Holz (EURO Palette)	EU-28: EURO pallet (EN15804 A1-A3) ts	[1]
Transport, Wasser (Frachter)	EU-28: Container ship incl. fuel, 27500 dwt capacity ts	[1]
Transport, Straße (LKW)	EU-28: Lorry transport, 22 t total weight ts ^f	[1]
Transport, Straße (Verkehrsbus)	EU-28: Lorry transport, 22 t total weight ts ^f	AP, [1]
Transport, Straße (Lieferwagen)	DE: Delivery van (EN15804 A4) ts	[1]
Transport, Straße (Personen-Kfz)	...average passenger car [proxy]	Tab. A-9
Abwasser (Aufbereitung)	EU-28: MWWT ^e (variable sludge treatment) ts	[1]

*Datenquelle: AP – Approximation | [1] - (GaBi 8.7, 2018).

^a High Density Polyethylen. ^b Polypropylen. ^c Low Density Polyethylen. ^d Lorry transport, incl. fuel, Euro 0-6 mix, 22 t total weight, 17.3t max payload ts. ^e Municipal waste water treatment. ^f Lorry transport incl. fuel, Euro 0-6 mix, 22 t total weight, 17.3t max payload.

Tabelle A-8. Approximation eines Produktionswerks für Flüssigwaschmittel (...production plant [proxy]) in GaBi 8.7 (DB version 2018 SP36). Veranschlagte Stoff-/ Energieströme und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze (vgl. Tabelle A-7).

Bezug	Prozess*	Flow	Menge**	Einheit
Input	GLO: Building, administration type ts	Building	2.50E-01	m ³
	GLO: Building, reinforced concrete frame construction ts	Building	2.50E-01	m ³
	GLO: Building, steel frame construction ts	Building	5.00E-01	m ³
Output	...production plant [proxy]	Production plant	1.00E+00	m ³

*Prozessdatensätze entsprechend GaBi 8.7 (DB version 2018 SP36). **Menge pro 1 m³ Produktionswerk (Production plant).

Tabelle A-9. Approximation des Transports mit einem durchschnittlichen Pkw in Deutschland (DE: Car average fuel and EURO mix [proxy]) in GaBi 8.7 (DB version 2018 SP36). Veranschlagte Stoff-/ Energieströme und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze (vgl. Tabelle A-7).

Bezug	Prozess*	Flow	Menge**	Einheit
Input	DE: Car diesel EURO 3 (EN15804 A4) ts	Vehicle kilometers	1.67E-01	km
	DE: Car diesel EURO 4 (EN15804 A4) ts	Vehicle kilometers	1.67E-01	km
	DE: Car petrol EURO 3 (EN15804 A4) ts	Vehicle kilometers	3.33E-01	km
	DE: Car petrol EURO 4 (EN15804 A4) ts	Vehicle kilometers	3.33E-01	km
Output	DE: Car average fuel and EURO mix [proxy]	Vehicle kilometers	1.00E+00	km

*Prozessdatensätze entsprechend GaBi 8.7 (DB version 2018 SP36). **Menge pro Fahrzeugkilometer eines durchschnittlichen KfZ in Deutschland (DE: Car average fuel and EURO mix [proxy]) (KBA, 2013).

Tabelle A-10. Bilanzierung der Materialzusammensetzung einer konventionellen Waschmaschine, bzw. konventionellen Trockners (vgl. Tabelle 4-26). Getroffene Annahmen und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze (DB version 2018 SP36).

Stoff-/ Energieströme	bilanziert als	DQ*
Kohlenstoffstahl, feuerverzinkt	EU-28: Hot dip galvanized structural Steel IFV ts-EPD	AP, [1]
Edelstahlblech	EU-28: Stainless steel sheet (EN15804 A1-A3) ts	[1]
Aluminiumblech	EU-28: Aluminium sheet mix ts	[1]
Kupferblech	EU-28: Copper Sheet Mix DKI/ECI	[1]
Polypropylen (PP)	RER: Polypropylene granulate (PP) ELCD/PlasticsEurope	[1]
Polystyrol (PS)	DE: Polystyrene granulate (PS) ts	[1]
Polyvinylidenchlorid (PVC)	EU-28: Polyvinyl chloride granulate (S-PVC) ts	[1]
Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	DE: Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Granulate (ABS) Mix ts	[1]
Acryl, antistatisch (AS)	EU-28: Acrylate sealing mass (EN15804 A1-A3) ts	AP, [1]
Polyethylenterephthalat (PET)	EU-28: PET bottle grade granulate ts	[1]
Plastik, unspezifisch	DE: Plastic profile SBR (EN15804 A1-A3) ts	[1]
Gummi (kg)	DE: Rubber sealing compound (EN15804 A1-A3) ts	[1]
Glas (kg)	EU-28: Window glass simple (EN15804 A1-A3) ts	[1]
Elektronikkomponenten, un spez.	GLO: Printed Wiring Board 16-layer rigid FR4 ts	AP, [1]

*Datenquelle: AP – Approximation | [1] - (GaBi 8.7, 2018).

Tabelle A-11. Bilanzierung der Montage und Verpackung einer konventionellen Waschmaschine, bzw. konventionellen Trockners (vgl. Tabelle 4-27). Getroffene Annahmen und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze (DB version 2018 SP36).

Stoff-/ Energieströme	bilanziert als	DQ*
Prozesswasser	EU-28: Tap water ts	[1]
Wasserdampf	RER: Steam (mp) PlasticsEurope	AP, [1]
Heizöl, schwer	EU-28: Heavy fuel oil at refinery (2.5wt.% S) ts	[1]
Elektrizität	EU-28: Electricity grid mix (average power plants) ts	[1]
Kraftliner und Papier (Karton)	EU-28: Kraft paper (EN15804 A1-A3) ts	[1]
Nylon	EU-28: Polyamide 6.6 fibres (PA 6.6) ts	[1]
Polyethylen (PE)	RER: Polyethylene film (PE-LD) PlasticsEurope	AP, [1]
Polystyrol (PS)	DE: Polystyrene granulate (PS) mix ts	[1]
Abwasser (Aufbereitung)	EU-28: MWWT ^a (variable sludge treatment) ts	[1]

*Datenquelle: AP – Approximation | [1] - (GaBi 8.7, 2018).

^a Municipal waste water treatment.

Tabelle A-12. Bilanzierung der Stoff- und Energieströme in den Teilprozessen D.04 und D.05 (Wäschepflege und Maschinentrockung, vgl. Tabelle 4-31 und 4-32). Getroffene Annahmen und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze (DB version 2018 SP36).

Stoff-/ Energieströme	bilanziert als	DQ*
Wasser	DE: Tap water from groundwater ts	[1]
Elektrizität	DE: Electricity grid mix (production mix) ts	[1]
Abwasser (Aufbereitung)	DE: MWWT ^a (variable sludge treatment) ts	[1]

*Datenquelle: AP – Approximation | [1] - (GaBi 8.7, 2018).

^a Municipal waste water treatment.

Tabelle A-13. Bilanzierung der Abfallbehandlung in den Teilprozessen D.06 und D.07 (End-of-life der Verpackungsmaterialien und Haushaltsgeräte, vgl. Tabelle 4-33 und 4-34). Getroffene Annahmen und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze.

Stoff-/ Energieströme	bilanziert als	DQ*
Recycling (68%)	EU-28: Recyclable waste sorting facility ts <u-bb>	AP, [1]
Deponie (18%)	...landfill mix [proxy]	Tab. A-14
Verbrennung (14%)	DE: MHW ^a in waste incineration plant ts	AP, [1]

*Datenquelle: AP – Approximation | [1] - (GaBi 8.7, 2018).

^a Municipal household waste.

Tabelle A-14. Approximation der Entsorgung von Siedlungsabfällen auf der Deponie (...landfill mix [proxy]) in GaBi 8.7 (DB version 2018 SP36). Veranschlagte Stoff-/ Energieströme und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze (vgl. Tabelle A-13).

Bezug	Prozess*	Flow	Menge**	Einheit
Input	DE: HW ^a (no C, worst case scenario incl. landfil) ts	Waste	2.81E-02	kg
	DE: HW ^a (C rich, worst case scenario incl. landfil) ts	Waste	2.81E-02	kg
	DE: MHW ^b on landfill ts	Waste	9.42E-01	kg
Output	...landfill mix [proxy]	Waste	1.00E+00	kg

*Prozessdatensätze entsprechend GaBi 8.7 (DB version 2018 SP36). **Menge pro 1 kg deponierte Siedlungsabfälle (...landfill mix [proxy]) (Statistisches Bundesamt, 2017).

^a Hazardous waste (statistic average). ^b Municipal household waste.

Tabelle A-15. Bilanzierung des Transportaufwands im Transportmodell tD.01 (Transport T-Shirt → D.04, vgl. Tabelle 4-35). Getroffene Annahmen und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze.

Stoff-/ Energieströme	bilanziert als	DQ*
Transport OV ^a , Straße (LKW)	EU-28: Lorry transport, 22 t total weight ts ^d	[1]
Transport OV ^a , Straße (Lieferwagen)	DE: Delivery van (EN15804 A4) ts	[1]
Transport EH ^b , Straße (Personen-Kfz)	DE: Car average fuel and EURO mix [proxy]	Tab. A-9
Transport EH ^b , Straße (Verkehrsbus)	EU-28: Lorry transport, 22 t total weight ts ^d	AP, [1]
Transport EH ^b , Schiene (ÖNV) ^c	EU-28: Rail transport incl. fuel, average train ^e	AP, [1]

*Datenquelle: AP – Approximation | [1] - (GaBi 8.7, 2018).

^a Onlineversand (Transportschritte beinhalten eine Retour-Quote von 17.5 %). ^b Erwerb im Einzelhandel. ^c Öffentlicher Nahverkehr. ^d Lorry transport incl. fuel, Euro 0-6 mix, 22 t total weight, 17.3t max payload. ^e Rail transport incl. fuel, average train, gross tonne weight 1000t / 726 t payload capacity.

Tabelle A-16. Bilanzierung des Transportaufwands im Transportmodell tD.02 und tD.03 (Transport von Verpackungsabfällen und verschlissenen Haushaltsgeräten, vgl. Tabelle 4-36 und 4-37). Getroffene Annahmen und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze.

Stoff-/ Energieströme	bilanziert als	DQ*
Transport, Straße (Personen-Kfz)	DE: Car average fuel and EURO mix [proxy]	Tab. A-9
Transport, Straße (Verkehrsbus)	EU-28: Lorry transport, 22 t total weight ts ^c	AP, [1]
Transport, Schiene (ÖNV) ^a	EU-28: Rail transport incl. fuel, average train ^d	AP, [1]
Transport, Straße (ATW) ^b	EU-28: Lorry transport, 22 t total weight ts ^c	AP, [1]

*Datenquelle: AP – Approximation | [1] - (GaBi 8.7, 2018).

^a Öffentlicher Nahverkehr. ^b Abfalltransportwagen. ^c Lorry transport incl. fuel, Euro 0-6 mix, 22 t total weight, 17.3t max payload. ^d Rail transport incl. fuel, average train, gross tonne weight 1000t / 726 t payload capacity.

Tabelle A-17. Bilanzierung des Abfallbehandlung im Teilprozess E.01 (End-of-life des abgetragenen T-Shirts, vgl. Tabelle 4-38). Veranschlagte Stoff-/ Energieströme und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze.

Stoff-/ Energieströme	bilanziert als	DQ*
Downcycling (11 %)	DE: Material sink (cotton fibre) ts	[1]
Deponie (52 %)	EU-28: Textiles on landfill ts	AP, [1]
Verbrennung (37 %)	DE: Textiles in municipal waste incineration plant ts	AP, [1]

*Datenquelle: AP – Approximation | [1] - (GaBi 8.7, 2018).

Tabelle A-18. Bilanzierung des Transportaufwands im Transportmodell tE.01, d. h., Transport T-Shirt → E.01. (vgl. Tabelle 4-39). Getroffene Annahmen und Zuordnung der verwendeten GaBi-Datensätze.

Stoff-/ Energieströme	bilanziert als	DQ*
Transport OV ^a , Straße (LKW)	EU-28: Lorry transport, 22 t total weight ts ^d	[1]
Transport OV ^a , Straße (Lieferwagen)	DE: Delivery van (EN15804 A4) ts	[1]
Transport EH ^b , Straße (Personen-Kfz)	DE: Car average fuel and EURO mix [proxy]	Tab. A-9
Transport EH ^b , Straße (Verkehrsbus)	EU-28: Lorry transport, 22 t total weight ts ^d	AP, [1]
Transport EH ^b , Schiene (ÖNV) ^c	EU-28: Rail transport incl. fuel, average train ^e	AP, [1]

*Datenquelle: AP – Approximation | [1] - (GaBi 8.7, 2018).

^a Onlineversand (Transportschritte beinhalten eine Retour-Quote von 17.5 %). ^b Erwerb im Einzelhandel. ^c Öffentlicher Nahverkehr. ^d Lorry transport incl. fuel, Euro 0-6 mix, 22 t total weight, 17.3t max payload. ^e Rail transport incl. fuel, average train, gross tonne weight 1000t / 726 t payload capacity.

Tabelle A-19. Umweltwirkungen der unterschiedenen Lebenswegphasen eines in Deutschland genutzten weißen Baumwolle T-Shirts entsprechend ausgewählter Wirkungsabschätzungskategorien.

Modul	ADP kg Sb-Äqv.	AP kg SO ₂ -Äqv.	EP mol N-Äqv.	FAETP kg DCB-Äqv.	GWP kg CO ₂ -Äqv.	MAETP kg DCB-Äqv.	LU DIV. ^b	WDP m ³ H ₂ O-Äqv.
∑ Lebenswegphasen ^a	7.00E-06	2.13E-02	5.18E-03	3.96E-01	3.70E+00	1.27E+03	3.76E+01	2.19E-01
Herstellung Vorprodukte	2.39E-07	1.19E-02	2.11E-03	7.28E-02	7.60E-01	5.57E+02	3.54E+01	8.20E-02
Fertigung T-Shirt	4.73E-06	5.03E-03	1.53E-03	3.10E-01	8.16E-01	4.26E+02	1.09E+00	7.81E-03
Handel & Vertrieb	1.72E-07	9.23E-04	1.71E-04	5.71E-03	1.49E-01	2.77E+01	4.45E-01	1.64E-03
Waschen ^b	1.21E-06	3.10E-03	1.25E-03	7.29E-03	1.69E+00	2.29E+02	5.64E-01	1.11E-01
Trocknen ^b	6.56E-07	3.32E-04	5.09E-05	4.03E-04	2.00E-01	3.13E+01	9.79E-02	1.81E-02
Lebenswegende (T-Shirt)	-9.42E-09	2.19E-05	7.67E-05	-8.86E-06	9.23E-02	-1.56E+00	-1.11E-02	-1.49E-03

^a Summe der unterschiedenen Lebenswegphasen (Module) des T-Shirts. Maßgebende Teilprozesse im Modul D (Nutzung und Pflege des T-Shirts). ^b Diverse: Das LANCA-Modell bewertet die Umweltwirkungen der Landnutzung auf der Grundlage verschiedener Indikatoren deren Ergebnisse in einem dimensionlosen Index zusammengefasst werden.