

Sven Gärtner, Guido Reinhardt, Julian Senn,
Claudius Grehl



DiTex

DIGITALE TECHNOLOGIEN ALS ENABLER

EINER RESSOURCENEFFIZIENTEN KREISLAUFFÄHIGEN B2B-TEXTILWIRTSCHAFT

Ökobilanz von nachhaltigen, kreislauf- fähigen Poloshirts

Impressum

Autor/innen:

Sven Gärtner (ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH)
Guido Reinhardt (ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH)
Julian Senn (ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH)
Claudius Grehl (ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH)

Der vorliegende Beitrag entstand im Forschungsprojekt „DiTex – Digitale Technologien als Enabler einer ressourceneffizienten kreislauffähigen B2B-Textilwirtschaft.“ Das Projekt ist Teil der Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert im Förderschwerpunkt Forschung für Nachhaltigkeit (FONA).

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FONA
Forschung für Nachhaltigkeit

ReziProK
Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft –
Innovative Produktkreisläufe

Projektkoordination

Dr. Frieder Rubik, Projektleitung
Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) GmbH, gemeinnützig
Potsdamer Str. 105
D-10785 Berlin
Tel. +49-6221-6491-66
Fax +49-30-882 54 39
frieder.rubik@ioew.de
www.ioew.de



| i | ö | w

INSTITUT FÜR
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Zitiervorschlag:

Gärtner, S., Reinhardt, G., Senn, J., Grehl, C. (2022): Ökobilanz von nachhaltigen, kreislauffähigen Poloshirts. <https://www.ifeu.de/publikation/ditex-oekobilanz-poloshirt/>

Heidelberg, November 2022

DiTex

DITEX-KREISLAUFWIRTSCHAFT.DE

Verbundpartner:

WILHELM WEISHÄUPL

WILHELM WEISHÄUPL
Hans Peter Weishäupl e.K.
Schwanthalerstrasse 49
D-80336 München



Dibella GmbH
Hamalandstraße 111
D-46399 Bocholt



Hochschule Reutlingen
TEXOVERSUM Fakultät Textil
Alteburgstraße 150
D-72762 Reutlingen

HOHENSTEIN ●

Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH
Schloss Hohenstein
D-74357 Boennigheim



ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
gGmbH
Wilckensstr. 3
D-69120 Heidelberg

Externer Dienstleister:



circular.fashion UG (haftungsbeschränkt)
Skalitzer Strasse 97
D-10999 Berlin

Assoziierter Partner:



MEWA Textil-Service AG & Co. Management OHG
John-F.-Kennedy-Straße 4
D-65189 Wiesbaden

Für nähere Informationen zum Projekt: www.ditex-kreislaufwirtschaft.de

Danksagung:

Wir bedanken uns herzlich bei den Mitarbeitenden des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) Dr. Frieder Rubik, Ria Müller, Christina Vogel, Sabrina Schmidt sowie Magdalena Müller, die diese Arbeit kompetent und mit viel Engagement begleitet haben. Ein besonderer Dank geht an Florian Kamm und Michael Kaspar der WILHELM WEISHÄUPL Hans Peter Weishäupl e.K., die uns als Entwickler und Vertreiber des DiTex-Poloshirts produktspezifische Informationen und Daten für die Übersichtsökobilanz zur Verfügung gestellt und zum fachlichen Austausch beigetragen haben. Ferner bedanken wir uns bei unseren ifeu-Kollegen Dr. Sonja Haertlé, Dr. Heiko Keller und Nils Rettenmaier für ihre wertvollen Hinweise und tatkräftige Unterstützung an dieser Studie sowie Ina Budde, circular.fashion, Barbara Boldrini, Martina Gerbig und Kai Nebel, Universität Reutlingen, Nicole Kiefer, Diana Wolf und Matthias Zoch, MEWA, und Dr. Kim Hecht, Hohenstein-Institut, für die konstruktive Begleitung bei unserem Klärungsbedarf und die kritische Durchsicht des Berichts.

Zusammenfassung

Die Umweltwirkungen der Textilbranche sind in den letzten Jahren zunehmend in den Fokus der öffentlichen Diskussion gerückt. Bis heute werden Textilien überwiegend aus Primärfasern hergestellt, vorwiegend aus Baumwolle und synthetischen Fasern. Mit der Gewinnung der benötigten Rohstoffe, der Herstellung der Textilien selbst, aber auch den Wasch- und Trocknungsprozessen während der Nutzung ist ein erhebliche Ressourcenverbrauch verbunden. Innerhalb des Forschungsprojekts „Digitale Technologien als Enabler einer ressourceneffizienten kreislauffähigen B2B-Textilwirtschaft“ wurden mittels Ökobilanzierung verschiedene Optimierungen eines Referenz-Poloshirts auf ihre Umweltwirkungen hin untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die höchsten Umweltentlastungen durch das Ersetzen von Baumwollfasern durch Recycling-Polyesterfasern sowie durch Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensdauer erzielt werden können. Weitere Reduktionen der Umweltwirkung des Poloshirts können durch das Ersetzen veralteter Waschstraßen und sonstiger Anlagen durch energieeffiziente Technologien, die Substitution phosphorhaltiger Verbindungen im Waschmittel durch gleichwertige Substanzen sowie den Einsatz erneuerbarer Energieträger entlang des gesamten Lebensweges erzielt werden. Andere Teilbereiche wie sämtliche Transporte entlang der textilen Kette, das Recycling von Polyesterfasern sowie die Höhe des Textilausschusses beim Recycling spielen keine wesentliche Rolle bei der Verminderung der Umweltwirkung des Poloshirts.

Abstract

In recent years, the textile industry's environmental impact has been increasingly under public scrutiny. Up until this point, textiles have predominantly been produced from primary fibres, mainly cotton and synthetic fibres. The extraction of the required raw materials, the production of the textiles themselves, but also the washing and drying processes during their use lead to a substantial consumption of resources. Using the life cycle assessment methodology, the research project entitled "Digital Technologies as an Enabler of a Resource-efficient Circular Economy: Pilot Test in the B2B Textile Industry" examined various optimisations of a reference polo shirt to test their environmental impact. The project concluded that the highest reduction in environmental impact can be achieved by replacing cotton fibres with recycled polyester fibres as well as by measures to increase the life span of the polo shirt. The following ways to optimise the environmental impact during the product's life cycle were also found to be highly effective: replacing outdated washing facilities and other equipment with energy-efficient technologies, substituting phosphorus-containing compounds in detergents with equivalent substances and using renewable energy sources along the entire life cycle. Further measures such as transport along the textile chain, the recycling of polyester fibres and the amount of textile waste during recycling were demonstrated to be insignificant in reducing the environmental impact of the polo shirt.

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund und Zielsetzung	7
2	Vorgehensweise und Rahmenbedingungen	8
2.1	Methodisches Vorgehen und Lebensweg	8
2.2	Untersuchte Produkte, Festlegungen und Basisdaten	9
2.3	Umweltwirkungskategorien	12
2.4	Rahmenbedingungen	14
2.4.1	Systemgrenzen	14
2.4.2	Zeitlicher und räumlicher Bezug	14
2.4.3	Funktionelle Einheit	14
2.4.4	Systemmodellierung: Recycling	15
2.4.5	Datenbasis	15
2.4.6	Sensitivitätsanalysen	15
3	Ergebnisse	16
3.1	Referenz- und DiTex-Poloshirt im Vergleich	16
3.2	Bedeutung der einzelnen Lebenswegabschnitte	18
3.3	Faserzusammensetzung	20
3.3.1	Verwendung von Polyester anstelle von Baumwolle	22
3.3.2	Verwendung von Recycling-Polyester anstelle von Polyester	23
3.4	Nutzungszyklen / Lebensdauer	24
3.5	Recycling	26
3.6	Energieaufwand in der Wäscherei	28
3.7	Ersetzen von Phosphorverbindungen	29
3.8	Einsatz erneuerbarer Energien	30
4	Zusammenführung und Schlussfolgerungen	32
5	Handlungsempfehlungen	33
6	Literaturverzeichnis	34
7	Anhang	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Lebenswegs eines typischen Textils. Bildquellen siehe ²	8
Abbildung 2.2: Vereinfachte Lebensweg-Schemata des Referenz- und des DiTex-Poloshirts. PES: Polyester, rPES: Recycling-Polyester, MVA: Müllverbrennungsanlage.....	9
Abbildung 3.1: CO₂-Fußabdruck des Referenz-Poloshirts sowie des DiTex-Poloshirts im Vergleich.	16
Abbildung 3.2: Einsparpotential bei den untersuchten Umweltwirkungen durch die umgesetzten Optimierungen des Poloshirts.	17
Abbildung 3.3: Ökologische Fußabdrücke des DiTex-Poloshirts über die gesamte Lebensdauer in einzelnen Lebenswegabschnitten.	19
Abbildung 3.4: Umweltwirkungen von Poloshirts mit unterschiedlicher Faserzusammensetzung im Vergleich. Betrachtete Szenarien siehe Text, Einheiten in Kapitel 2.3. Bildquellen siehe ³	21
Abbildung 3.5: CO₂-Fußabdruck und Energieaufwand für die Bereitstellung und das Material (Nutzung) des Polyesters in einem Referenz-Poloshirt und einem Poloshirt mit Recycling-Polyester anstelle von Polyester (Details siehe Text). * entspricht 215 g (r)PES.	23
Abbildung 3.6: Umweltwirkungen von Poloshirts mit unterschiedlich hoher Lebensdauer im Vergleich. Betrachtete Szenarien siehe Text, Einheiten in Kapitel 2.3. Bildquellen siehe ⁴	25
Abbildung 3.7: Umweltwirkungen von Poloshirts für unterschiedlich effiziente Recyclingtechnologien im Vergleich. Betrachtete Szenarien siehe Text, Einheiten in Kapitel 2.3. Bildquellen siehe ⁵	27
Abbildung 3.8: Bandbreite des CO₂-Fußabdrucks verschiedener Wäschereiprozesse (graue Balken) und der Wäscherei gesamt (unterer Balken) bezogen auf 1 kg Wäsche.	28
Abbildung 3.9: Phosphat-Fußabdruck des DiTex-Poloshirts in Abhängigkeit des Einsatzes verschiedener phosphorhaltiger Verbindungen in den zur Wäsche eingesetzten Substanzen. * siehe Text.	29
Abbildung 3.10: Umweltwirkungen des DiTex-Poloshirts bei Nutzung unterschiedlicher erneuerbarer Energieträger im Vergleich. Betrachtete Szenarien siehe Text, Einheiten in Kapitel 2.3. Bildquellen siehe ⁶	31
Abbildung 7.1: Lebenswegschema des Referenz-Poloshirts.....	35
Abbildung 7.2: Lebenswegschema des DiTex-Poloshirts.	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung der beiden untersuchten Poloshirts und ausgewählte Basisparameter für die Übersichtsökobilanz.	10
Tabelle 2: Betrachtete Umweltwirkungskategorien der Übersichtsökobilanz des Poloshirts.....	13

Abkürzungsverzeichnis

AWARE	Available water remaining (nach [Boulay et al. 2018])
B2B	Business to Business
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CFC-11	Chlorofluorocarbon 11 (Trichlorfluormethan)
DiTex ...	Digitale Technologien als Enabler einer ressourceneffizienten kreislauffähigen B2B-Textilwirtschaft
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
ISO	International Organization for Standardization
MVA	Müllverbrennungsanlage
PE	Primärenergie
PES	Polyester
PET	Polyethylenterephthalat
PV	Photovoltaik
rPES	Recycling-Polyester

1 Hintergrund und Zielsetzung

Die Umweltwirkungen der Textilbranche sind in den letzten Jahren zunehmend in den Fokus der öffentlichen Diskussion gerückt. Bis heute werden Textilien überwiegend aus Primärfasern hergestellt, vorwiegend aus Baumwolle und synthetischen Fasern. Mit der Gewinnung der notwendigen Rohstoffe, der Herstellung der Textilien selbst, aber auch den Wasch- und Trocknungsprozessen während der Nutzung sind zum Teil erhebliche Ressourcenverbräuche und Umweltauswirkungen verbunden.



Um Erkenntnisse abzuleiten, wie in Zukunft die Textilwirtschaft nachhaltiger gestaltet werden kann, wurde das Forschungsprojekt „DiTex – Digitale Technologien als Enabler einer ressourceneffizienten kreislauffähigen B2B-Textilwirtschaft“ im Rahmen der Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe“ (ReziProK) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) aufgelegt.

Ziel dieses Projektes war die Verbesserung der Nachhaltigkeit von Textilien. Die hierzu durchgeführten Maßnahmen umfassten unter anderem die Entwicklung recyclingfähiger Textilien, deren Faserzusammensetzung teils verändert wurde, sowie die Verbesserung der dazugehörigen Logistik und Recyclingprozesse¹.

Als wesentlicher Teil des Projektes wurden ausgewählte Optimierungen für drei beispielhaft untersuchte Textilien, nämlich eine Bettgarnitur, ein Businesshemd und ein Poloshirt, auf ihre ökologischen Auswirkungen und Ressourceneffizienzen untersucht.

Dieser Bericht ist einer der drei Arbeitsberichte [Gärtner, Haertlé, et al. 2022; Gärtner, Reinhardt & Senn 2022; Gärtner, Reinhardt, Senn, et al. 2022], die für die drei untersuchten Textilien entstanden sind. Er umfasst die Ergebnisse der Übersichtsökobilanz eines Poloshirts, wie es in zahlreichen Berufen wie beispielsweise von Mitarbeitenden des Bevölkerungsschutzes als Bestandteil der Berufskleidung getragen wird, sowie daraus abgeleitete Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen.

¹ Details siehe [Müller et al. 2021]

2 Vorgehensweise und Rahmenbedingungen

Die Ermittlung der ökologischen Auswirkungen des neu entwickelten DiTex-Poloshirts im Vergleich zum Referenzprodukt erfolgt mittels sogenannter Übersichtsökobilanzen. Hierbei wird aufgezeigt, ob und in welchem Ausmaß die Umsetzung des DiTex-Gesamtkonzepts zu einer Verbesserung der Umweltauswirkungen und zu Ressourceneinsparungen führen kann.

Im Folgenden wird die Methodik der Übersichtsökobilanz erklärt (Kapitel 2.1), das untersuchte Produktsystem beschrieben (Kapitel 2.2) sowie die untersuchten Umweltwirkungskategorien (Kapitel 2.3) und die gewählten Rahmenbedingungen aufgeführt (Kapitel 2.4). Die generelle Methodik zur Analyse der drei in diesem Projekt untersuchten Textilien, die betrachteten Umweltwirkungskategorien sowie die gewählten Rahmenbedingungen sind identisch. Darüber hinaus werden jedoch textilspezifische Festlegungen (Kapitel 2.2) getroffen.

2.1 Methodisches Vorgehen und Lebensweg

Die ökologische Bewertung der untersuchten Poloshirts erfolgt mit einer Übersichtsökobilanz. Die Berechnung orientiert sich an den internationalen Normen für Produkt-Ökobilanzen ISO 14040 und 14044 [ISO 2021a; b]. Dabei werden die Umweltauswirkungen aller Input- und Outputflüsse des untersuchten Produkts entlang seines gesamten Lebensweges („von der Wiege bis zur Bahre“) betrachtet.

Der Lebensweg des Poloshirts beinhaltet die Produktion des Textils einschließlich der vorgelegerten Prozesse wie die Bereitstellung von Polyester oder die Landwirtschaft inklusive aller Betriebsmittel wie Düngemittel und deren Bereitstellung, die Herstellung des Poloshirts selbst (inklusive Fasererzeugung, Spinnen, Stricken, Veredeln, Konfektionieren), die Nutzung inklusive der Wäschereiprozesse sowie die Verwertung am Lebensende. Dabei sind auch sämtliche Lagerungs- und Transportprozesse miteingeschlossen. Eine schematische Darstellung des Lebensweges wird in Abbildung 2.1 gezeigt.



Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Lebenswegs eines typischen Textils. Bildquellen siehe ²

Wesentliche Basisparameter für die Übersichtsökobilanz sowie entscheidende Kenngrößen des Poloshirts sind in Kapitel 2.2, insbesondere in Tabelle 1 aufgeführt. Weitere Details zu den in der Übersichtsökobilanz gesetzten Rahmenbedingungen werden in Kapitel 2.4 dargelegt.

² © Casa.da.Photo – stock.adobe.com; © Lukas Gojda / Fotolia; © seagames50 – stock.adobe.com; © fatihyalcin – stock.adobe.com; © Andrii Zastrozhnov – stock.adobe.com; © Tanya Rozhnovskaya – stock.adobe.com; © annaspoka – stock.adobe.com

2.2 Untersuchte Produkte, Festlegungen und Basisdaten

Das untersuchte Produktsystem umfasst ein Poloshirt, das als Berufskleidung von Mitarbeitenden des Bevölkerungsschutzes des Kreises Lippe als Bestandteil der Berufskleidung getragen wurde. Das Shirt besteht neben der textilen Fläche aus einem Umspinnzwirn aus Polyester, Etiketten aus Polyester sowie Polyester-Knöpfen. Es werden eine Referenz- und eine DiTex-Variante des Shirts betrachtet und einander gegenübergestellt; weitere ausführliche Details zu den untersuchten Poloshirts können [Müller et al. 2021] entnommen werden.

Vereinfachte Lebenswegeschemata der beiden Textilien sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Die vollständigen Lebenswegeschemata können Abbildung 7.1 und Abbildung 7.2 im Anhang entnommen werden.

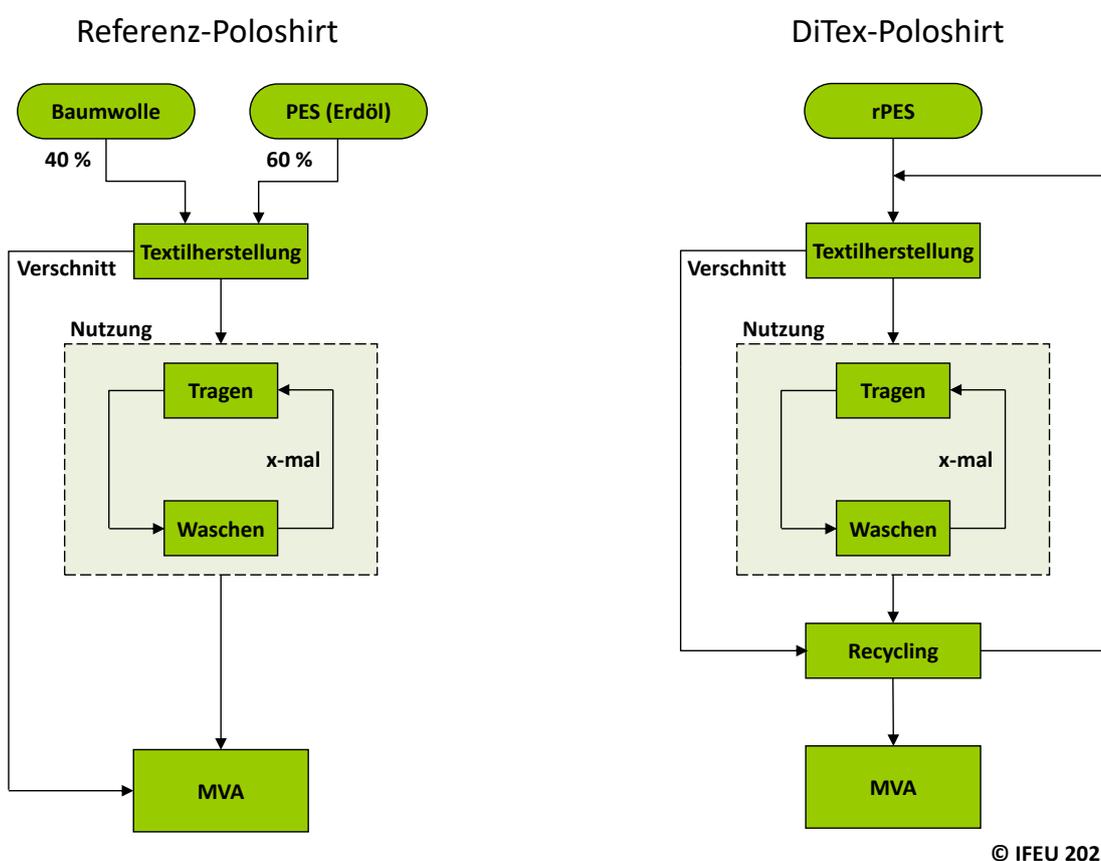


Abbildung 2.2: Vereinfachte Lebensweg-Schemata des Referenz- und des DiTex-Poloshirts. PES: Polyester, rPES: Recycling-Polyester, MVA: Müllverbrennungsanlage.

Die Poloshirts weisen vergleichbare Eigenschaften und Nutzengleichheit auf. Dies betrifft die Trageeigenschaften, die Tragezeit zwischen zwei Waschzyklen sowie die Haltbarkeit. Das neu entwickelte Textil wurde in folgenden Teilbereichen optimiert: Faserzusammensetzung und Lebensende (Recycling). Die wesentlichen Unterschiede der beiden untersuchten Poloshirts sowie ausgewählte Basisparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der beiden untersuchten Poloshirts und ausgewählte Basisparameter für die Übersichtsökobilanz.

	Poloshirt	
	Referenz-Poloshirt	DiTex-Poloshirt
Hersteller	Weishäupl	
Material	Polyester / Baumwolle: 60 % / 40 %	Recycling-Polyester: 100 %
Produktgewicht	285 g	285 g
Verschnitt	20 %	20 %
Waschort	Wäscherei	Wäscherei
Produktlebensende	50 % Altkleidersammlung */ 50 % Entsorgung	Sortierung 90 % Recycling 10 % Entsorgung
Recycling	Kein Recycling	Recycling-Polyester: 10 % Ausschuss **
Entsorgung	100 % thermische Verwertung (ohne Gutschrift Zwischennutzen, da genügend Alternativen auf dem Markt sind)	10 % des Recycling-Polyesters: thermische Verwertung (Ausschuss)

* weitere Informationen zum Umgang mit Altkleidersammlung im Text bei „Produktlebensende“ (vgl. Kapitel 2.2 unten)

** Ausgangswert: Variationen mittels Sensitivitätsanalysen

Nachfolgend werden für wesentliche Prozesse, Lebenswegabschnitte und genutzte Materialien für die Übersichtsökobilanz notwendige Festlegungen dargelegt:

– **Materialzusammensetzung**

Die für die Materialzusammensetzung genutzten Parameter basieren auf Angaben des Herstellers Weishäupl [Kamm 2022]. Details können Tabelle 1 entnommen werden.

– **Konventionelle Baumwolle:**

Da es sich bei dieser Studie um einen Systemvergleich und nicht um eine spezifische produktbezogene Ökobilanz handelt, wird der globale Durchschnitt der Baumwollproduktion für die in den Referenz-Poloshirts verarbeitete Baumwolle gesetzt. Hierfür wird eine länderspezifische Gewichtung nach Produktionsvolumen vorgenommen (siehe [Senn et al. 2022]).



© dietwalthner - stock.adobe.com

- **Polyester / Recycling-Polyester:**
In dieser Untersuchung wird die in Europa typische, durchschnittliche Polyester- bzw. Recycling-Polyester-Produktion angesetzt. Die Herstellung von Polyester-Fasern erfolgt im Wesentlichen aus fossilen Quellen (insbesondere Erdöl und Erdgas).
- **Lebensdauer:**
Eines der Ziele des Forschungsvorhabens war es, die Textilien und die verbundene Logistik so zu optimieren, dass die Anzahl der Nutzungszyklen – vereinfacht ausgedrückt: die Lebensdauer – erhöht werden können. Für Berufskleidung, insbesondere für Poloshirts im Einsatz bei Mitarbeitenden des Bevölkerungsschutzes, werden 50 Nutzungszyklen angesetzt [Kamm 2022] und über diverse Sensitivitätsanalysen abgesichert.
- **Transporte zu Recyclinganlagen:**
Für die Transporte zu und von den Recyclinganlagen wird ein zukünftig funktionierendes Logistiksystem mit adäquater Verteilung von Recyclinganlagen innerhalb Europas angesetzt, so dass diese Anlagen in angemessener Nähe zu den zukünftigen Anwendern liegen. Es wird eine Transportdistanz von durchschnittlich 500 km angesetzt.
- **Recycling (betrifft DiTex-Poloshirt):**
Ein wichtiges Ziel des Forschungsvorhabens war es, den Umbau in eine zirkuläre Textilwirtschaft zu analysieren und zu fördern. Hierzu sollte ein möglichst hoher Rezyklatanteil eingesetzt sowie hochwertiges chemisches Faser-zu-Faser-Recycling genutzt werden. Dabei können entweder über das Zwischenprodukt Polyestergranulat oder über die Ausgangsmonomere Terephthalsäure und Monoethylenglykol neue Polyesterfasern erzeugt werden. Das Recycling soll nicht nur für die Post-Consumer-Textilien, sondern analog auch für die Zuschnittreste durchgeführt werden. Da das betrachtete Textilrecycling noch nicht vollständig industriell entwickelt ist und Daten zu Energie- und Massenbilanzen nicht öffentlich zugänglich sind, wird in einem Standard-Szenario angesetzt, dass die Gesamtmenge für das Recycling eingesetzter fossiler Energieträger höchstens dem der Herstellung von Polyester aus fossilen Primärrohstoffen entspricht. Mit Sensitivitätsanalysen wird die mögliche Bandbreite der Ergebnisse bestimmt. Während des Recyclingprozesses des Poloshirts entsteht ein systembedingter Ausschuss von Textilfasern, der die Effizienz des Verfahrens verringert. Die Höhe des Ausschusses bzw. der Recyclingrate wird im Standard-Szenario auf 10 % der Polyesterfasern festgesetzt und in Sensitivitätsanalysen auf ihre Auswirkung auf die Ergebnisse analysiert (siehe Kapitel 3.5). Des Weiteren wird angesetzt, dass der Ausschuss entsprechend der üblichen Verwertungswege in Deutschland der thermischen Verwertung in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) zugeführt wird, wofür eine energetische Gutschrift angerechnet wird.



© Tasha Vector-
stock.adobe.com

– **Produktlebensende (betrifft Referenz-Poloshirt):**

Die für das Produktlebensende genutzten Parameter (vgl. Tabelle 1) wurden auf der Basis einer Expert*inneneinschätzung vorgenommen und über Sensitivitätsanalysen abgesichert. Für den Anteil an Textilien, der nach der Nutzung als Poloshirt nicht direkt thermisch in einer MVA verwertet wird, wird eine zwi-



© annaspoka –
stock.adobe.com

schengeschaltete Sekundärnutzung (z. B. Putzlappen oder Altkleidersammlung) angesetzt. Für diese Zwischennutzung wird dem System keine zusätzliche Gutschrift angerechnet, da es aktuell und in absehbarer Zukunft ein Überangebot an Textilien auf dem Sekundärmarkt geben wird und eine separate Produktion von Sekundärtextilien aus Frischfasern für z. B. Putzlappen daher unrealistisch ist. Für die hier betrachteten Textilien wird am Ende ihrer Sekundärnutzung somit eine energetische Gutschrift auf der Basis einer thermischen Verwertung in einer MVA angerechnet. Analog wird mit den Zuschnittresten verfahren.

2.3 Umweltwirkungskategorien

Alle wesentlichen Umweltaspekte der textilen Wertschöpfungskette sollten in den untersuchten Wirkungskategorien der Übersichtsökobilanz umfassend erfasst werden. Neben Umweltauswirkungen, die durch den Energiebedarf in der Textilproduktion geprägt sind, spielen vor allem auch die Bereitstellung von Polyester, der landwirtschaftliche Anbau von Baumwolle und anderer Biomasse (z. B. zur Herstellung von Tensiden) sowie die Prozesse beim Waschen (in der Wäscherei) eine signifikante Rolle. Die hierbei mit großem Abstand wichtigsten Umweltauswirkungen bzw. Ressourceninanspruchnahmen sind daher der CO₂-Fußabdruck, der Wasser-, Flächen- und Phosphat-Fußabdruck, der Energieaufwand, die Versauerung sowie der stratosphärische Ozonabbau. Diese Umweltwirkungskategorien werden der hier erstellten Übersichtsökobilanz zugrunde gelegt und sind in Tabelle 2 kurz beschrieben.

Tabelle 2: Betrachtete Umweltwirkungskategorien der Übersichtsökobilanz des Poloshirts.

Wirkungs- kategorie	Einheit	Kurzbeschreibung
CO ₂ -Fußabdruck	kg CO ₂ - Äquivalente	Beschreibt die Verstärkung des Treibhauseffekts, also die Erwärmung der Atmosphäre in Folge der vom Menschen verursachten Freisetzung von klimawirksamen Gasen. Neben Kohlenstoffdioxid (CO ₂) werden auch Methan (CH ₄) und Lachgas (Distickstoffoxid, N ₂ O) sowie eine Reihe von klimawirksamen Spurengasen erfasst und mit Bezug zu CO ₂ zu CO ₂ -Äquivalenten zusammengefasst [IPCC 2021].
Energieaufwand	MJ PE- Äquivalente	Energieeinsatz bzw. -einsparung ist ein Indikator der Ressourcenbeanspruchung. Üblicherweise wird in Ökobilanzen die nicht erneuerbare Primärenergie ausgewiesen. Zu den nicht erneuerbaren Energieträgern zählen die fossilen Brennstoffe Erdöl, Erdgas und Kohle sowie Uranerz. Die Primärenergie umfasst sowohl den Energieinhalt der Energieträger als auch den Aufwand für deren Bereitstellung (Förderung, Raffinerie, Transporte etc.). Die verschiedenen Primärenergieträger werden in Primärenergie (PE)-Äquivalente zusammengefasst. Im Folgenden wird diese Umweltwirkungskategorie der Einfachheit halber mit „Energieaufwand“ bezeichnet.
Wasser- Fußabdruck	m ³ Wasser- Äquivalente	Für die Berechnung des Wasser-Fußabdrucks wird die verbrauchte Wassermenge gewichtet nach Wasserqualitäten und der Wasserknappheit in dem Land, in dem der jeweilige Verbrauch stattfindet. Das Ergebnis wird in Wasser-Äquivalenten angegeben. Details siehe AWARE-Methode [Boulay et al. 2018].
Flächen- Fußabdruck	m ² artifizielle Flächen Äquiva- lente · Jahre (aF-Äq. · a)	Ökosysteme mit einer geringen menschlichen Eingriffsstärke und einem hohen Maß an Selbstregulation zeigen geringere negative Wirkungen auf das Gesamtsystem, die Bodenfunktion und Biodiversität als Ökosysteme, deren Selbstregulation durch eine hohe Eingriffsstärke beeinträchtigt ist. Bei der Berechnung werden die belegten Flächen gewichtet nach ihrer jeweiligen Distanz zu einem natürlichen Zustand zu artifiziellen Flächen-Äquivalenten zusammengefasst. Details siehe [Fehrenbach et al. 2019].
Phosphat- Fußabdruck	g Phosphat- gestein- Äquivalente	Phosphat ist eine global erschöpfliche Ressource. Es wird in der Regel im Bergbau außerhalb Deutschlands gewonnenen. Sämtliche eingesetzten phosphorhaltigen Verbindungen werden bezogen auf das insgesamt benötigte Phosphatgestein in Phosphatgestein-Äquivalente zusammengefasst. Details siehe [Reinhardt et al. 2019].
Versauerung	g SO ₂ - Äquivalente	Versauerung schädigt sensible Ökosysteme wie Wälder, Magerwiesen, Gewässer, aber auch Gebäude (Stichwort: „Saurer Regen“). Diese Versauerung wird durch säurebildende Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Ammoniak und Chlorwasserstoff verursacht. Sämtliche säurebildende Luftschadstoffe werden mit Bezug zu SO ₂ zu SO ₂ -Äquivalenten zusammengefasst.
Stratosphäri- scher Ozon- abbau	mg CFC-11- Äquivalente	Bestimmte Gase wie FCKW oder Lachgas zerstören das schützende Ozon in der Stratosphäre (Stichwort „Ozonloch“). Diese Gase werden mit Bezug zum Fluorchlorkohlenwasserstoff CFC-11 zu CFC-11-Äquivalenten zusammengefasst.

2.4 Rahmenbedingungen

Neben dem bereits in Kapitel 2.1 beschriebenen methodischen Vorgehen und der Darstellung des betrachteten Lebensweges werden nachfolgend weitere ausgewählte Parameter und Setzungen beschrieben.



© Andrii Zastrozhnov –
stock.adobe.com

2.4.1 Systemgrenzen

Für die Ökobilanzierung wird der gesamte Lebensweg von der Fasererzeugung inklusive sämtlicher Input-Ströme bis zur Entsorgung bzw. dem Recycling betrachtet (siehe Abbildung 2.2 bzw. Abbildung 7.1 und Abbildung 7.2 im Anhang). Dabei werden auch alle Logistikaufwendungen inklusive Transporte und Reststoffströme erfasst. Aufwendungen für die Infrastruktur, wie z. B. der Bau von Spinn- oder Webmaschinen, Lagergebäuden oder Fahrzeugen, sind vernachlässigbar, denn sie treten sowohl beim DiTex-Textil wie auch beim Referenztextil auf. Diese Aufwendungen werden wegen sehr geringer Abweichungen zwischen den verschiedenen Szenarien und geringerer Anteile an den Umweltwirkungen nicht ausgewiesen.

2.4.2 Zeitlicher und räumlicher Bezug

Die Berechnungen bilden die Produktion und Nutzung um das Jahr 2022 ab. Bei allen Prozessen, die noch nicht vollständig bis zur Marktreife entwickelt sind, wie bei den Recyclingprozessen oder einer Massenproduktion der neu entwickelten recyclingfähigen Textilien, werden typische Massen- und Energieeffizienzen für industriell ausgereifte Verfahren angesetzt.

Der räumliche Bezug ist Deutschland. Für alle vor- und nachgelagerten Prozesse, wie zum Beispiel die Baumwollproduktion oder Erdölgewinnung, werden die entsprechenden Verhältnisse weltweit berücksichtigt.

2.4.3 Funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit wird der **Nutzen eines Poloshirts** über die gesamte Lebensdauer (d. h. Nutzungsdauer) mit typischerweise 50 Nutzungs- und Waschzyklen betrachtet.

Diese funktionelle Einheit erlaubt aber keinen Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Nutzungsdauern, weil *ein* Poloshirt mit beispielsweise 40 Nutzungs- bzw. Waschzyklen nicht den gleichen Nutzen hat wie *ein* Poloshirt mit 50 Nutzungs- bzw. Waschzyklen. Bei Sensitivitätsanalysen, bei welchen unterschiedliche Nutzungs- bzw. Waschzyklen miteinander verglichen werden, wird als funktionelle Einheit daher eine bestimmte **Anzahl an Nutzungen** von Poloshirts festgelegt. Als gut handhabbare Größe für die Ergebnisdarstellung wurden 1.000 Nutzungen gesetzt, wobei jede andere Zahl zu gleichen relativen Ergebnissen führen würde. Für 1.000 Nutzungen werden dann je nach betrachteter Lebensdauer jedes einzelnen Poloshirts rechnerisch insgesamt 10 – 25 Poloshirts benötigt.

2.4.4 Systemmodellierung: Recycling

Für das Polyester im DiTex-Poloshirt wird ein Closed-Loop-Recycling angesetzt (vgl. mit Abbildung 7.2).

Sämtlicher Ausschuss entlang des Lebenswegs wird durch Primärmaterial ergänzt außer bei den Schnittresten. Diese werden direkt in das Recyclingverfahren zurückgeführt.

Um mögliche Artefakte in den Ergebnissen durch den Einbezug einer Erstproduktion aus 100 % Startmaterial auszuschließen, werden, wie dies bei entsprechenden Recyclingfragestellungen bei noch nicht in der Praxis existierenden Technologiepfaden standardmäßig angesetzt wird, so viele Nutzungs- und Waschzyklen angenommen, dass die Erstproduktion des Poloshirts gegenüber den Recycelzyklen nicht mehr ins Gewicht fällt.

2.4.5 Datenbasis

Die Bilanzierung basiert auf folgenden Datengrundlagen:

- Textile Herstellungs- und Wäscherei-prozesse:
Literaturwerte und Daten aus der ifeu-internen Datenbank sowie Daten, die mit Expert*innen aus dem Konsortium abgestimmt worden sind [ifeu 2022].
- Vorketten (von Hilfsstoffen, Energieträgern etc.) und sonstige Daten: Datenbankwerte aus Ökobilanz-Datenbanken des ifeu [ifeu 2022] und ecoinvent [Ecoinvent 2020].



© damark – Fotolia

2.4.6 Sensitivitätsanalysen

Um den Einfluss ausgewählter, variabler Parameter auf das Gesamtsystem besser zu verstehen und als wichtige oder unwichtige Stellschrauben einordnen zu können, wurde eine Reihe an Sensitivitätsanalysen durchgeführt. In diesem Bericht werden Analysen zu Parametern mit wesentlichem Einfluss auf die Umweltauswirkungen des Poloshirts aufgeführt. Diese betreffen die Lebensdauer, das Recycling sowie die eingesetzten Energieträger und Waschsubstanzen.

3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Übersichtsökobilanz dargestellt. Zunächst werden die Umweltwirkungen des Referenz-Poloshirts mit der des DiTex-Shirts verglichen (Kapitel 3.1), bevor der Einfluss einzelner Lebenswegabschnitte auf alle untersuchten Umweltwirkungskategorien gezeigt wird (Kapitel 3.2). Darauffolgend wird in den Kapiteln 3.3 bis 3.8 näher auf die entscheidenden Faktoren für die Umweltlast des Poloshirts eingegangen.



© pixindy – stock.adobe.com

3.1 Referenz- und DiTex-Poloshirt im Vergleich

Abbildung 3.1 zeigt die Ergebnisse des CO₂-Fußabdrucks des Referenz- sowie des DiTex-Poloshirts und weist das durch die umgesetzten Optimierungen erreichte Einsparpotential aus.

Die Ergebnisse des CO₂-Fußabdrucks zeigen, dass durch die Optimierung in einzelnen Prozessstufen des Lebensweges, wie beispielsweise der Primärmaterial-Vorkette sowie der Faserherstellung, eine gewisse Einsparung an Treibhausgasen erzielt werden kann. Dies wirkt sich jedoch nicht merklich auf den gesamten CO₂-Fußabdruck des Poloshirts aus.

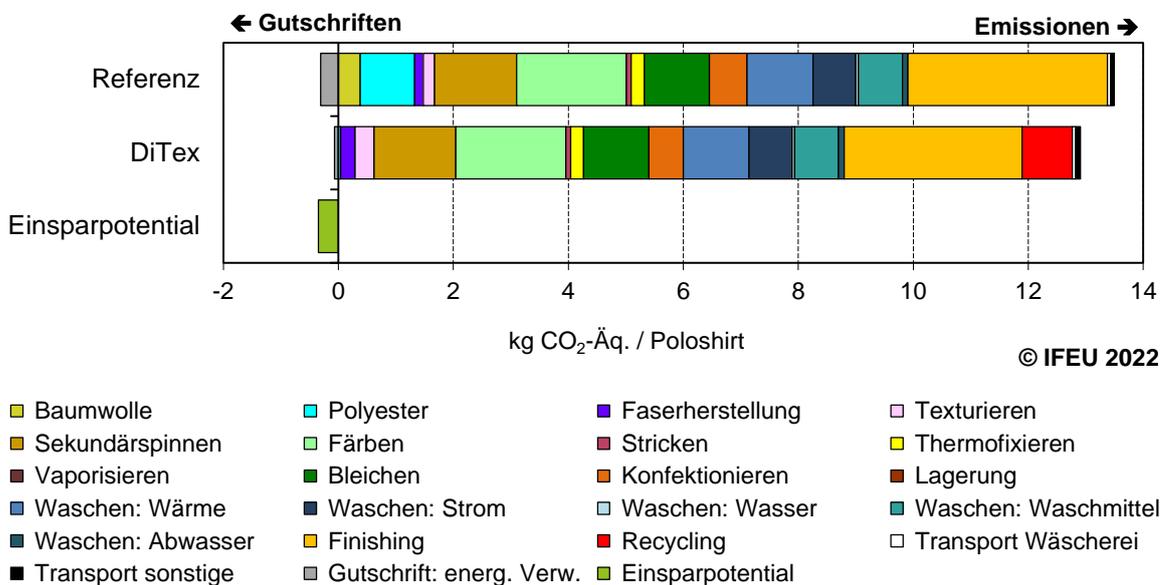


Abbildung 3.1: CO₂-Fußabdruck des Referenz-Poloshirts sowie des DiTex-Poloshirts im Vergleich.

Bei Betrachtung aller analysierter Umweltwirkungen (Abbildung 3.2) zeigt sich beim Vergleich vom DiTex-Poloshirt mit dem Referenz-Poloshirt, dass die Umweltlast bei bestimmten Umweltwirkungen durch die umgesetzten Optimierungen deutlich reduziert werden kann.

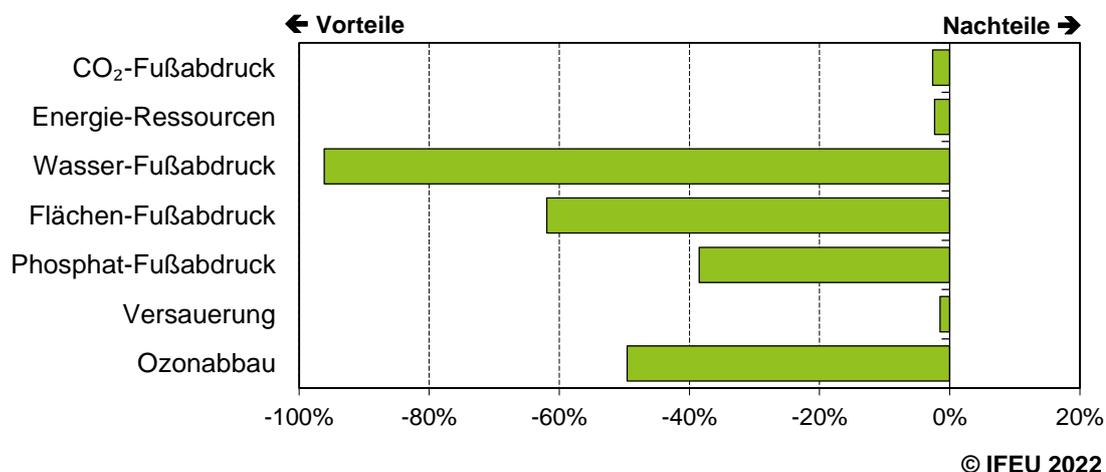


Abbildung 3.2: Einsparpotential bei den untersuchten Umweltwirkungen durch die umgesetzten Optimierungen des Poloshirts.

Die Kombination der umgesetzten Optimierungen des Poloshirts führt generell zu einer reduzierten Umweltlast. Besonders ausgeprägt ist das Einsparpotential durch die Verwendung des DiTex-Poloshirts im Vergleich zum Referenz-Poloshirt beim Wasser-Fußabdruck, beim Flächen-Fußabdruck und dem stratosphärischen Ozonabbau, aber auch der Phosphat-Fußabdruck kann deutlich gesenkt werden. Lediglich geringe Vorteile können beim CO₂-Fußabdruck, der Nutzung nicht-erneuerbarer Energie-Ressourcen sowie der Versauerung erzielt werden.

Fazit

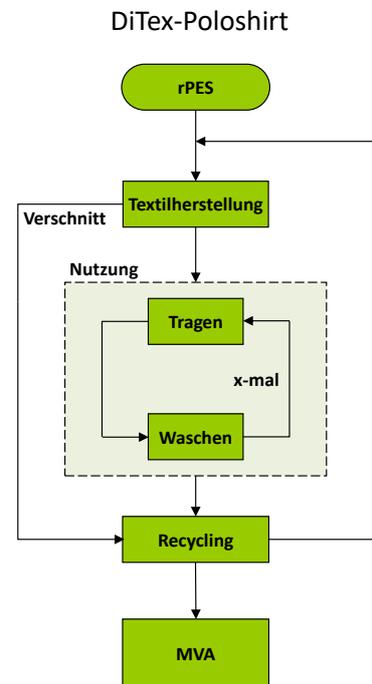
- Durch die beim DiTex-Poloshirt umgesetzten Optimierungen kann die Umweltlast des Poloshirts zum Teil signifikant reduziert werden, nachteilige Effekte gibt es keine.
- Damit ist es aus Umweltsicht lohnenswert, den im Projekt eingeschlagenen Weg der Entwicklung eines nachhaltigen, kreislauffähigen Poloshirts bis zur systematischen Marktreife fortzuführen.

3.2 Bedeutung der einzelnen Lebenswegabschnitte

Abbildung 3.3 zeigt die Ergebnisse aller untersuchten Umweltwirkungen des neu entwickelten DiTex-Poloshirts über die gesamte Lebensdauer aufgedgliedert in die einzelnen Lebenswegabschnitte. Die einzelnen Prozesse tragen in jeweils unterschiedlichem Maß zur gesamten Umweltlast des Poloshirts bei, wobei sich der Einfluss je Prozess von Umweltwirkung zu Umweltwirkung wiederum unterscheidet.

Folgende Faktoren für die Umweltlast, bei denen große Einsparungen erzielt und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können, wurden identifiziert und werden nachfolgend näher beschrieben:

- Faserzusammensetzung
- Nutzungszyklen / Lebensdauer
- Recycling
- Energieaufwand in der Wäscherei
- Phosphorverbindungen in Waschmitteln
- Einsatz erneuerbarer Energien



© IFEU 2022

© Sondem – stock.adobe.com



Aus Abbildung 3.3 ist erkenntlich, dass andere Teilbereiche innerhalb der Textil-Prozesskette, wie beispielsweise Transporte entlang des gesamten Lebensweges oder einzelne Prozesse in der Textilproduktion wie das Texturieren, keine wesentliche Rolle spielen, weshalb nachfolgend nicht mehr auf diese Aspekte eingegangen wird. Andere Teilaspekte mit größerem Einfluss auf das Gesamtergebnis, wie der Färbeprozess, konnten im Rahmen des Projektes

leider nicht näher betrachtet werden und werden daher im weiteren Verlauf ebenfalls nicht vertieft.

3.3 Faserzusammensetzung

Traditionell bestehen Poloshirts aus 100% Baumwolle. Durch den hohen Wasserbedarf und Pestizideinsatz im Baumwoll-Anbau wird die Nachhaltigkeit von Baumwolle in der Öffentlichkeit vermehrt in Frage gestellt.

Poloshirts können für Formbeständigkeit und hohe Strapazierfähigkeit des Textils mit einem hohen Anteil an Synthefasern (meistens Polyesterfasern) hergestellt werden. Unter anderem aufgrund der Nutzung fossiler Primärrohstoffe sind Polyesterfasern in der Öffentlichkeit nicht als ökologische Textilfasern bekannt. Diese können jedoch in der Regel ohne weiteres durch recycelte Polyesterfasern ersetzt werden.



© Recycle Man
- stock.adobe.com

Entgegen der verbreiteten Meinung, ein Poloshirt bräuchte zwingend einen Baumwoll-Anteil, ist es durchaus möglich, Poloshirts mit gutem Tragekomfort auch ausschließlich aus (Recycling-)Polyesterfasern herzustellen.

Zur Analyse des Einflusses einer Änderung der Fasermaterialien auf die Umweltwirkung von zirkulären Poloshirts wurden folgende Szenarien betrachtet:

- **Referenz**
Referenz-Poloshirt aus 60 % Polyester und 40 % Baumwolle.
- **Polyester (PES) → Recycling-Polyester (rPES)**
Beim Referenz-Poloshirt wird der Polyester-Anteil durch Recycling-Polyester ersetzt.
- **Geänderte Faseranteile**
Beim Referenz-Poloshirt wird der Anteil an Baumwolle durch Polyester ersetzt, so dass das Poloshirt aus 100 % primärem Polyester besteht.
- **DiTex**
DiTex-Poloshirt aus 100 % Recycling-Polyester.

Die Ergebnisse der untersuchten Umweltwirkungskategorien sind in Abbildung 3.4 dargestellt.

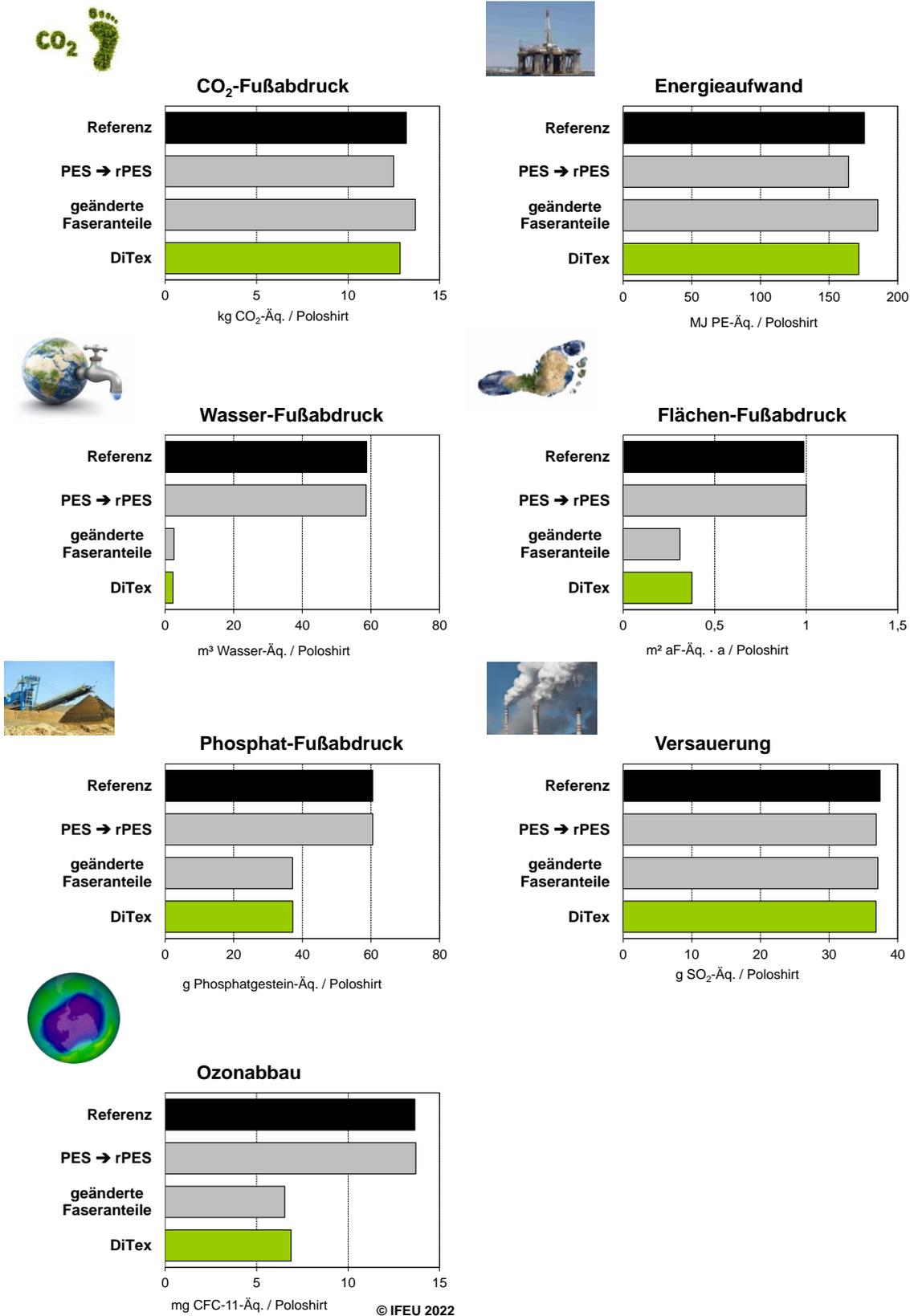


Abbildung 3.4: Umweltwirkungen von Poloshirts mit unterschiedlicher Faserzusammensetzung im Vergleich. Betrachtete Szenarien siehe Text, Einheiten in Kapitel 2.3. Bildquellen siehe ³

³ CO₂-Fußabdruck: © Jenny_Sturm – stock.adobe.com, Energieaufwand: © Jenny_Sturm – stock.adobe.com, Wasser-Fußabdruck: © corund – stock.adobe.com, Flächen-Fußabdruck: © Creativemarc / Fotolia, Phosphat-Fußabdruck: © fannyes / Fotolia, Versauerung: © kamilpetran / Fotolia, Ozonabbau: © NASA – Wikimedia Commons

3.3.1 Verwendung von Polyester anstelle von Baumwolle

Mit der Nutzung von Polyesterfasern sowie von Recycling-Polyesterfasern können aufgrund veränderter Oberflächenbeschaffenheit und weiterer Konstruktionsmerkmale Textileigenschaften wie Luftzirkulation und Feuchtigkeitsabtransport gewährleistet werden. Hinsichtlich der Funktionalität können damit in vielen Fällen Baumwollfasern problemlos durch diese Fasern ersetzt werden.



© Piman Khrutmuang
- stock.adobe.com

Die Ergebnisse der Übersichtsökobilanz zeigen, dass durch den Einsatz von Polyester und die damit verbundene Vermeidung des landwirtschaftlichen Anbaus der Baumwolle signifikante Vorteile beim Wasser-, Flächen- und Phosphat-Fußabdruck sowie beim Ozonabbau erzielt werden können, bei geringen Nachteilen beim CO₂-Fußabdruck sowie der Nutzung fossiler Energie-Ressourcen und gleichen Ergebnissen für Versauerung.

Die leichten Verschlechterungen im Hinblick auf den CO₂-Fußabdruck sowie den Energieaufwand kommen durch den etwas schlechteren Fußabdruck von (Roh-)Polyester im Vergleich zu Baumwolle zustande. Die deutliche Verbesserung im Hinblick auf Wasser-, Flächen- und Phosphat-Fußabdruck überwiegen diese leichten Tendenzen bei weitem. Im Hinblick auf die gesamte Umweltlast kann daher das Ersetzen von Baumwollanteilen durch Polyesterfasern empfohlen werden.

Fazit:

- Eine Verwendung Polyesterfasern anstelle von Baumwolle, wie es beim DiTex-Poloshirt umgesetzt wurde, bietet ein großes Potenzial zur Verringerung der Umweltlast des Poloshirts, insbesondere durch die Vermeidung des landwirtschaftlichen Anbaus der Baumwolle, und sollte deshalb zukünftig angestrebt werden.

3.3.2 Verwendung von Recycling-Polyester anstelle von Polyester

Recycling-Polyester (rPES) und Polyester aus fossilem Primärmaterial sind chemisch identisch, weshalb eine Verwendung von Recycling-Polyester zur Textilproduktion technisch unproblematisch ist.

In Abbildung 3.4 sind die Ergebnisse für den Vergleich der Umweltwirkungen des Referenz-Poloshirts mit einem Shirt, bei dem Recycling-Polyester anstelle von Polyester verwendet wird, aufgeführt. Daraus ergibt sich, dass eine Verwendung von Textilfasern aus Recycling-Polyester bei den betrachteten Umweltwirkungskategorien weder zu signifikanten Einsparungen noch zu nennenswerten Nachteilen im Vergleich zur Referenz-Textilie führt.



© Tasha Vector-stock.adobe.com

Zur Veranschaulichung, welchen Umwelteinfluss alleine das Material aufweist, sind in Abbildung 3.5 beispielhaft die Ergebnisse für den CO₂-Fußabdruck und den Energieaufwand nur des (Recycling-)Polyester-Anteils des Poloshirts dargestellt – die anderen Umweltwirkungen wie der Wasserfußabdruck sind davon nicht wesentlich betroffen. Betrachtet werden folgende Szenarien: Einsatz von fossilem Polyester (PES) im Referenz-Poloshirt, Einsatz von Recycling-Polyester (rPES) im Referenz-Poloshirt und Einsatz von Recycling-Polyester mit einem 90 % verringertem Energiebedarf für das Recycling (siehe Kapitel 3.5).

Es zeigt sich: Grundsätzlich verringert die Verwendung von Recyclingmaterial anstelle von Primärmaterial zwar den CO₂-Fußabdruck und den Einsatz fossiler Energie-Ressourcen, dieser ist bezogen auf den gesamten Lebensweg des Poloshirts jedoch vernachlässigbar gering (vgl. Abbildung 3.3). Grund hierfür ist, dass der Energiebedarf der Herstellung und der Nutzungsphase des Textils deutlich höher ist, als der Unterschied zwischen den beiden Polyestervarianten. Selbst bei einem stark reduzierten Energiebedarf (- 90 %) können im Vergleich zum restlichen Lebensweg kaum signifikante Einsparungen erzielt werden.

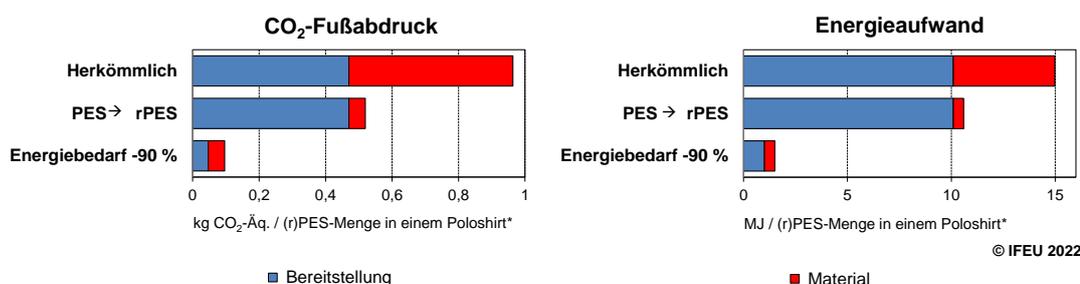


Abbildung 3.5: CO₂-Fußabdruck und Energieaufwand für die Bereitstellung und das Material (Nutzung) des Polyesters in einem Referenz-Poloshirt und einem Poloshirt mit Recycling-Polyester anstelle von Polyester (Details siehe Text). * entspricht 215 g (r)PES.

Fazit:

- Eine Verwendung von Recycling-Polyester anstelle von Polyester, wie es beim DiTex-Poloshirt umgesetzt wurde, bietet kein relevantes Potenzial zur Verringerung der Umweltlast des Poloshirts bei Mietwäsche mit hohen Umlaufzahlen.
- Schwerpunkt von Umweltoptimierungen beim Poloshirt bei Mietwäsche mit hohen Umlaufzahlen sollten daher andere Teilbereiche entlang des Lebenswegs des Poloshirts sein, beispielsweise die Reduktion von Baumwollanteilen oder energieeffiziente Produktions- und Wäschereiprozesse.

3.4 Nutzungszyklen / Lebensdauer

Ein wichtiger Aspekt bei der ökologischen Nachhaltigkeit von Textilien ist deren Lebensdauer. Eine erhöhte Langlebigkeit zeichnet sich durch eine größere Anzahl realisierbarer Nutzungs- und Waschzyklen aus, bis das Textil aufgrund geringer gewordener Qualität nicht mehr zu nutzen ist und dann entsorgt bzw. recycelt werden muss. Bei einer erhöhten Langlebigkeit müssen für den gleichen Nutzen eine geringere Fasermenge und letztlich weniger Textilien produziert werden. Dies kann zu einer signifikanten Reduktion der Umweltauswirkungen führen. Eine erhöhte Lebensdauer kann beispielsweise durch die Nutzung qualitativ hochwertiger Gewebe, eine höhere Akzeptanz bei Farbveränderung, bei Verschleißerscheinungen und bei sonstigen Qualitätsminderungen oder durch einen schonenderen Umgang mit den Textilien erreicht werden.



© irissca-stock.adobe.com

Zur Analyse des Einflusses einer verlängerten Lebensdauer auf die Umweltwirkung von Poloshirts wurden folgende Anzahlen an Nutzungs- und Waschzyklen betrachtet. Dabei stellt das DiTex-Poloshirt mit 50 Nutzungszyklen die Vergleichsbasis (grün) für die Sensitivitätsanalysen (grau) dar:

- **40 Nutzungszyklen**
Das Poloshirt weist eine verminderte Lebensdauer von 40 Nutzungszyklen auf.
- **50 Nutzungszyklen**
Das Poloshirt weist eine typische Lebensdauer von 50 Nutzungszyklen auf.
- **60 Nutzungszyklen**
Das Poloshirt weist eine erhöhte Lebensdauer von 60 Nutzungszyklen auf.
- **80 Nutzungszyklen**
Das Poloshirt weist eine erhöhte Lebensdauer von 80 Nutzungszyklen auf.
- **100 Nutzungszyklen**
Das Poloshirt weist eine erhöhte Lebensdauer von 100 Nutzungszyklen auf.

Die Ergebnisse der untersuchten Umweltwirkungskategorien sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Als Bezugsgröße dienen hier 1.000 Nutzungszyklen (Erklärung in Kapitel 2.4.3).

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verlängerung der Lebensdauer in nahezu allen Umweltwirkungen einen signifikant positiven Einfluss hat. Lediglich beim Phosphat-Fußabdruck, der beim DiTex-Poloshirt maßgeblich auf die verwendeten Waschmittel zurückzuführen ist (vergleiche Abbildung 3.3), fallen die Einsparungen geringer aus.

Fazit

- Eine Verlängerung der Lebensdauer sollte angestrebt werden, da diese Maßnahme zu einer deutlichen Verringerung der Umweltwirkungen von Poloshirts beitragen kann.
- Hierfür müssen zukünftig sowohl langlebige Materialien entwickelt und eingesetzt sowie eine entsprechende Akzeptanz bei betroffenen Interessengruppen geschaffen werden.

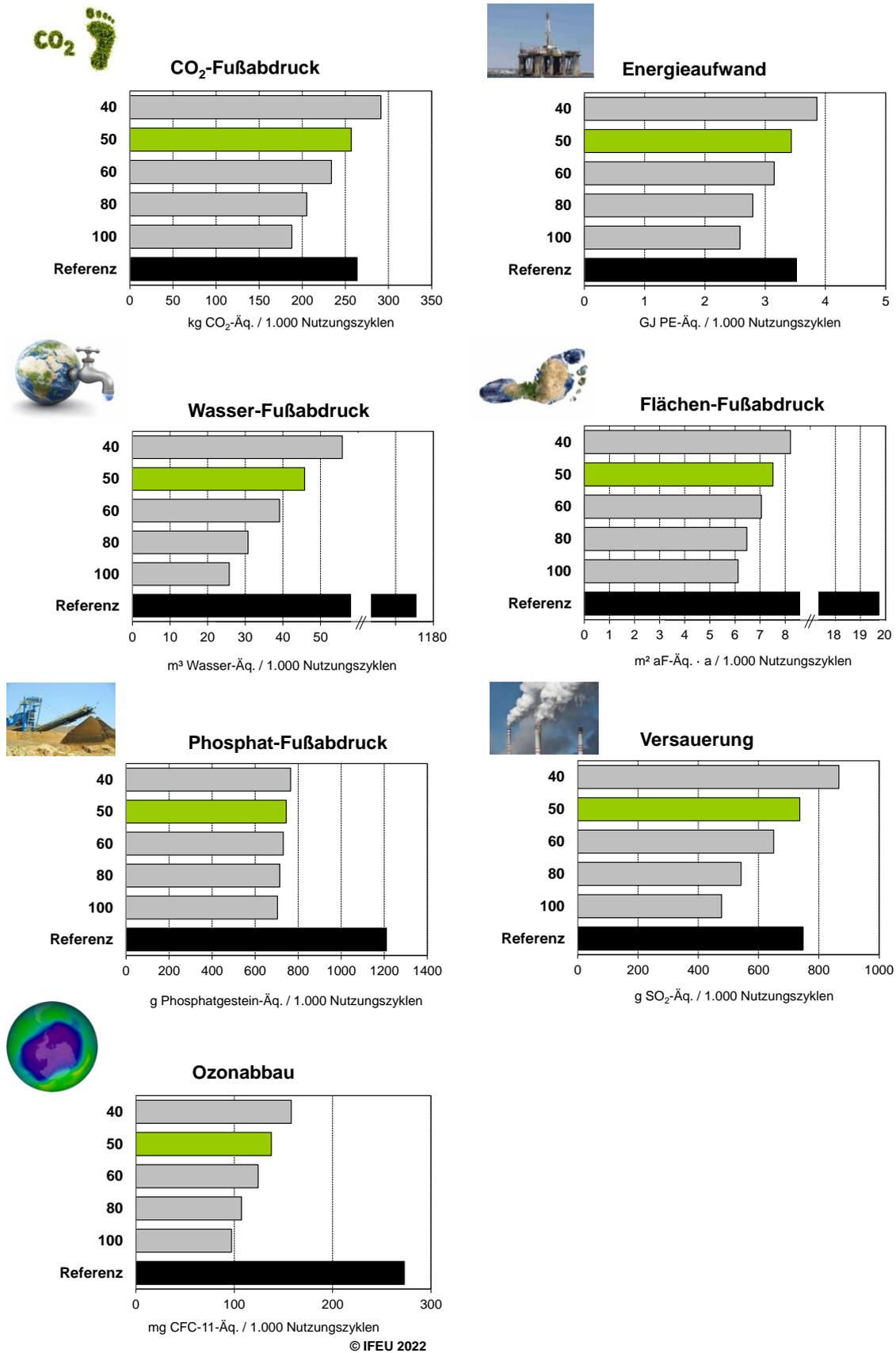
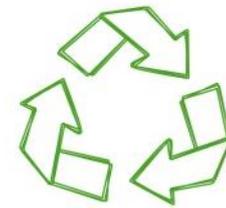


Abbildung 3.6: Umweltwirkungen von Poloshirts mit unterschiedlich hoher Lebensdauer im Vergleich. Betrachtete Szenarien siehe Text, Einheiten in Kapitel 2.3. Bildquellen siehe⁴

⁴ CO₂-Fußabdruck: © Jenny_Sturm – stock.adobe.com, Energieaufwand: © Jenny_Sturm – stock.adobe.com, Wasser-Fußabdruck: © corund – stock.adobe.com, Flächen-Fußabdruck: © Creativemarc / Fotolia, Phosphat-Fußabdruck: © fannyes / Fotolia, Versauerung: © kamilpetran / Fotolia, Ozonabbau: © NASA – Wikimedia Commons

3.5 Recycling

Das Recycling von Textilien wird in der Öffentlichkeit immer wieder als elementarer Aspekt einer nachhaltigen Textilwirtschaft genannt. Landläufig wird die Meinung vertreten, dass besonders die Effizienz der genutzten Textilrecycling-Technologie, also vor allem der benötigte Energieaufwand sowie die Höhe des Faserausschusses, die Umweltauswirkung von Recyclingtextilien bestimmt. In diesem Kapitel wird analysiert, welchen Einfluss ein reduzierter Energieaufwand durch Effizienzsteigerung der Recyclingtechnologien (siehe auch Kapitel 3.3.2) sowie der Faserausschuss auf die Umweltwirkung des DiTex-Poloshirts hat. Hierzu wurden folgende Szenarien untersucht:



© Recycling Anna –
stock.adobe.com

- **Referenz**
Referenz-Poloshirt ohne Recycling.
- **Energiebedarf - 50 %**
Der für das Recyclingverfahren benötigte Energiebedarf ist im Vergleich zum Standard-Verfahren um 50 % reduziert.
- **Energiebedarf - 90 %**
Der für das Recyclingverfahren benötigte Energiebedarf ist im Vergleich zum Standard-Verfahren um 90 % reduziert.
- **Ausschuss 20 %**
Der Ausschuss an Polyesterfasern beim Recycling liegt bei 20 %.
- **Ausschuss 1 %**
Der Ausschuss an Polyesterfasern beim Recycling liegt bei 1 %.
- **DiTex**
Standard-Recyclingverfahren mit einem Energiebedarf in Höhe der heutzutage typischerweise benötigten Energie. Der Ausschuss an Polyesterfasern liegt bei 10 %.

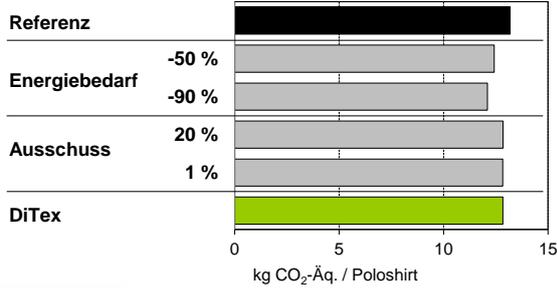
Die Ergebnisse der untersuchten Umweltwirkungskategorien sind in Abbildung 3.7 dargestellt. Daraus ergibt sich, dass Recycling allgemein nur einen geringen Einfluss auf die Reduktion der Umweltwirkungen des Poloshirts aufweist. Sowohl ein reduzierter Energiebedarf für das Recycling als auch die Höhe des Faserausschusses beim Recycling sind vernachlässigbar. Um signifikante Vorteile durch Recycling des Poloshirts zu erreichen, ist weitere Entwicklungsarbeit zur Erreichung einer systematischen Marktreife notwendig. Dabei ist sicherzustellen, dass der Gesamtenergieaufwand für das Recycling nicht höher ist als derjenige für die Produktion von Fasern aus Primärrohstoffen.

Fazit

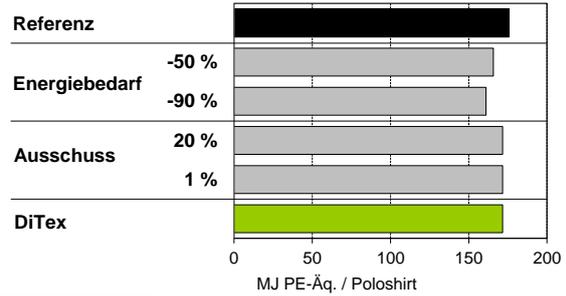
- Das Recyclingverfahren selbst hat keinen nennenswerten direkten Einfluss auf die Umweltbilanz des Poloshirts bei Mietwäsche mit hohen Umlaufzahlen. Er ist aber integraler Baustein einer kreislauffähigen Textilproduktion und aus diesem Grunde bis zur Marktreife weiterzuentwickeln.
- Dabei muss aber auch sichergestellt werden, dass der gesamte Ressourceneinsatz des Recyclingverfahrens nicht höher ist als der zur Produktion von Primärfasern.



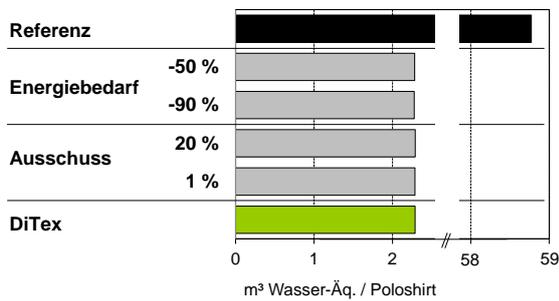
CO₂-Fußabdruck



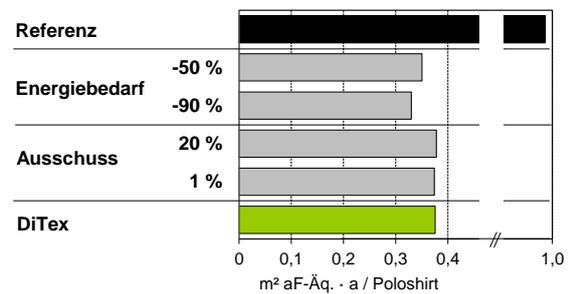
Energieaufwand



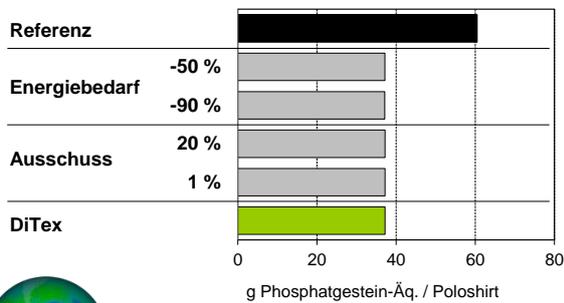
Wasser-Fußabdruck



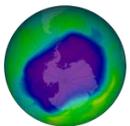
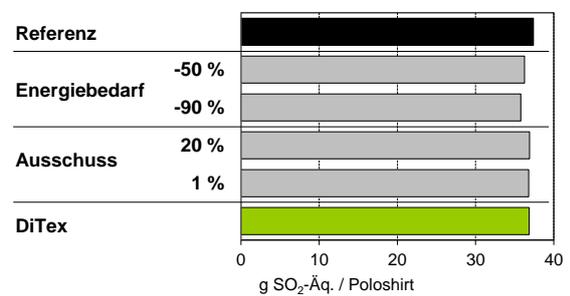
Flächen-Fußabdruck



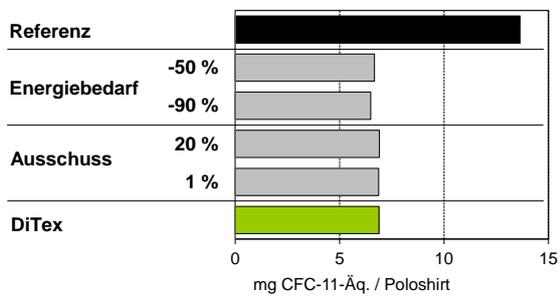
Phosphat-Fußabdruck



Versauerung



Ozonabbau



© IFEU 2022

Abbildung 3.7: Umweltwirkungen von Poloshirts für unterschiedlich effiziente Recyclingtechnologien im Vergleich. Betrachtete Szenarien siehe Text, Einheiten in Kapitel 2.3. Bildquellen siehe ⁵

⁵ CO₂-Fußabdruck: © Jenny_Sturm – stock.adobe.com, Energieaufwand: © Jenny_Sturm – stock.adobe.com, Wasser-Fußabdruck: © corund – stock.adobe.com, Flächen-Fußabdruck: © Creativemarc / Fotolia, Phosphat-Fußabdruck: © fannyes / Fotolia, Versauerung: © kamilpetran / Fotolia, Ozonabbau: © NASA – Wikimedia Commons

3.6 Energieaufwand in der Wäscherei

In Wäschereien wird für Wasch- und Trockenprozesse bis zum Finishing von Textilien eine erhebliche Energiemenge benötigt, was mit großen Umweltauswirkungen einhergeht. Die Bandbreite des für die einzelnen Wäschereiprozesse notwendigen Energieaufwands ist aufgrund der Nutzung unterschiedlich alter und effizienter Wäschereitechnologien sehr groß. Die Bandbreite der damit verbundenen CO₂-Fußabdrücke ist nochmals erhöht abhängig von den eingesetzten Energieträgern zur Strom- und Wärmebereitstellung. Hinzu kommt, dass durch Erfahrungsunterschiede des Personals die Waschstraßen unterschiedlich effizient bedient werden (was in den hier untersuchten Szenarien jedoch nicht abgebildet wird).

In Abbildung 3.8 sind die Bandbreiten der in Großwäschereien verursachten CO₂-Fußabdrücke aufgeführt, differenziert nach den typischerweise eingesetzten Wäschereiprozessen Waschen, Trocknen, Mangeln und Finishing (eigene Berechnung basierend auf [VTS 2021]). Die energieeffizientesten Anlagen bestimmen das linke (untere) Ende der Bandbreite, die ineffizientesten Anlagen das rechte (obere) Ende. Die Linie innerhalb der Bandbreite gibt den CO₂-Fußabdruck einer jeweils typischen Anlage an. Da textilabhängig nicht alle Wäschereiprozesse durchgeführt werden, ist die Summe der Einzelprozesse größer als der gesamte CO₂-Fußabdruck. Für das Poloshirt relevant sind die Prozesse Waschen und Finishing. Die gestrichelte Linie innerhalb des Balkens für die Wäscherei gesamt entspricht dem in dieser Studie abgeleiteten, spezifischen Wert für das Poloshirt.

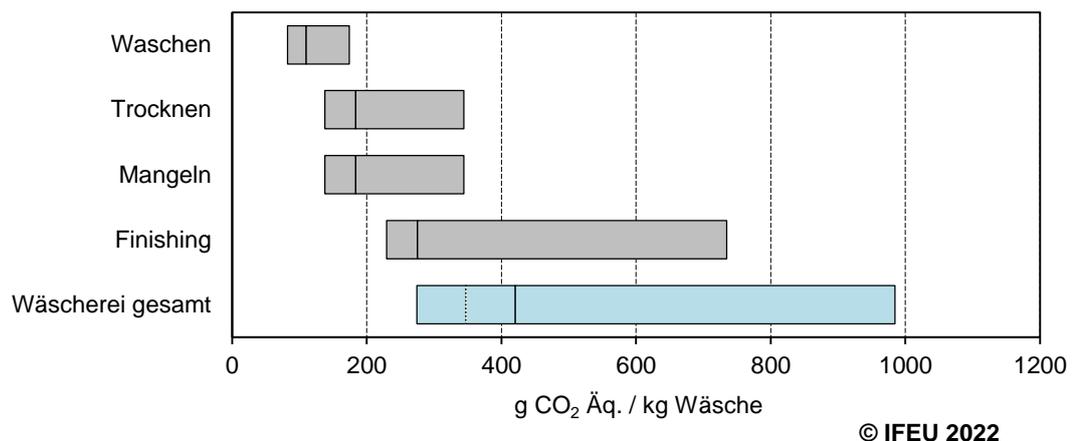


Abbildung 3.8: Bandbreite des CO₂-Fußabdrucks verschiedener Wäschereiprozesse (graue Balken) und der Wäscherei gesamt (unterer Balken) bezogen auf 1 kg Wäsche.

Der durch die Wäscherei verursachte CO₂-Fußabdruck weist eine sehr große Bandbreite auf. In Abbildung 3.8 wird erkenntlich, dass durch den Einsatz energieeffizienter Waschstraßen, Trockner und Finisher umfangreiche THG-Einsparungen erzielt werden können.

Fazit

Aus Umweltsicht ist anzustreben, Maßnahmen zur Reduktion der Umweltauswirkungen durch Großwäschereien umzusetzen. Dazu gehören insbesondere:

- Ersetzen veralteter Waschstraßen und sonstiger Anlagen durch energieeffiziente Waschstraßen, Trockner und Finisher.
- Schulungen des Wäschereipersonals zur optimierten Prozessführung.
- Nutzung erneuerbarer Energieträger (siehe Kapitel 3.8).

3.7 Ersetzen von Phosphorverbindungen

Als mineralischer Rohstoff ist Phosphat bzw. Phosphor eine nicht-erneuerbare Ressource. Je nach Quelle beträgt die statische Reichweite der globalen Phosphatreserven nur einige Jahrzehnte bis wenige Jahrhunderte [Reinhardt et al. 2019]. Entlang des Lebensweges eines Poloshirts tragen vor allem folgende Teilbereiche zum Phosphat-Fußabdruck des Textils bei: (1) Nutzung phosphorhaltiger Verbindungen wie Phosphate und Phosphonate, die in der Wäscherei als Härtestabilisator und Waschkraftverstärker eingesetzt werden, (2) Verwendung von phosphorhaltigem Dünger beim Biomasseanbau zur Produktion pflanzlicher Tenside in Waschmitteln sowie (3) Sonstige Prozesse beispielsweise mit Bezug zur Energieerzeugung (siehe Kapitel 3.8). Zur Analyse, welchen Einfluss diese Teilbereiche und insbesondere die Nutzung typischer phosphorhaltiger-Verbindungen und deren Mengen auf den Phosphat-Fußabdruck von zirkulären Poloshirts haben, werden folgende Szenarien betrachtet:

- **5 % Phosphonate (DiTex Basisszenario)**
Die Summe der zur Wäsche eingesetzten Substanzen beinhaltet 5 % Phosphonate.
- **10 % Phosphonate**
Die Summe der zur Wäsche eingesetzten Substanzen beinhaltet 10 % Phosphonate.
- **10 % Phosphate**
Die Summe der zur Wäsche eingesetzten Substanzen beinhaltet 10 % Phosphate.
- **Ohne phosphorhaltige Verbindungen**
Die zur Wäsche eingesetzten Substanzen beinhalten alternative Waschsubstanzen und keinerlei phosphorhaltige Verbindungen.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.9 dargestellt.

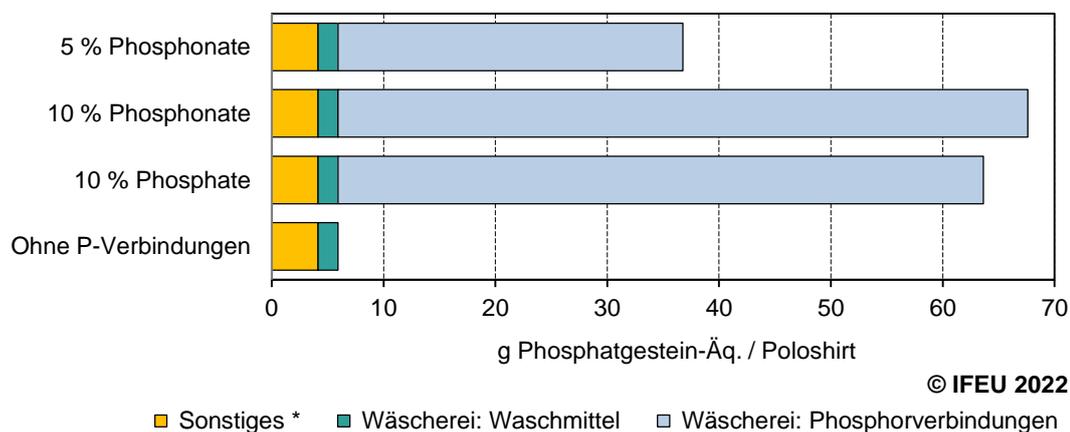


Abbildung 3.9: Phosphat-Fußabdruck des DiTex-Poloshirts in Abhängigkeit des Einsatzes verschiedener phosphorhaltiger Verbindungen in den zur Wäsche eingesetzten Substanzen. * siehe Text.

Fazit

- Phosphorhaltige Verbindungen in der Wäscherei können maßgeblich für den Phosphat-Fußabdruck des Poloshirts verantwortlich sein.
- Durch das Ersetzen von phosphorhaltigen Verbindungen durch gleichwertige Substanzen ohne Phosphor können deutliche Umweltvorteile erzielt werden.

3.8 Einsatz erneuerbarer Energien

Entlang des Lebenswegs von Textilien werden zum Teil erhebliche Energieaufwendungen benötigt. Insbesondere zu nennen sind hier die Gewinnung der Primärmaterialien, die Herstellung der Textilien selbst sowie Wäschereiprozesse. Diese Energie wird oftmals durch fossile Energieträger bereitgestellt, was mit deutlichen Umweltauswirkungen einhergeht. In diesem Kapitel wird beispielhaft dargestellt, welchen Einfluss die Nutzung von erneuerbarem Strom zur Verringerung der Umweltlast des DiTex-Poloshirts aufweist. Die Energieträger zur Wärmebereitstellung bleiben unverändert. Betrachtet werden folgende Szenarien:

- **DiTex**
Für sämtliche Stromaufwendungen während des gesamten Lebenswegs des DiTex-Poloshirts wird der Strommix der jeweiligen Länder angesetzt (Bezug: 2021).
Spezifisches Treibhauspotential: Rohstoffgewinnung und Produktion in Asien: 1.121 g CO₂-Äq. / kWh, Wäscherei und Recycling in Europa: 428 g CO₂-Äq. / kWh.
- **PV-Strom**
Für sämtliche Stromaufwendungen wird die Nutzung von Photovoltaik-Strom angesetzt. Spezifisches Treibhauspotential: 82 g CO₂-Äq. / kWh.
- **Erneuerbarer-Energie-Mix**
Für sämtliche Stromaufwendungen wird ein Mix aus erneuerbarer Energie (Photovoltaik und Windkraft) gesetzt. Spezifisches Treibhauspotential: 51 g CO₂-Äq. / kWh.
- **Windkraft, offshore**
Für sämtliche Stromaufwendungen wird die Nutzung von Strom aus Offshore-Windkraft angesetzt. Spezifisches Treibhauspotential: 20 g CO₂-Äq. / kWh.

Für sämtliche Energieträger werden die jeweils zugrundeliegenden spezifischen Treibhauspotentiale, die spezifischen Ressourceneinsätze sowie die weiteren Umweltwirkungen einbezogen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.10 dargestellt.

Die Ergebnissen zeigen, dass die Umweltlast des Poloshirts alleine durch die Nutzung erneuerbaren Stroms (PV und / oder Windkraft) signifikant reduziert werden kann. Dies betrifft insbesondere den CO₂-Fußabdruck, den Energieaufwand sowie die Versauerung und den Ozonabbau. Durch die Verbrennung von Biomasse und Kohle zur Stromgewinnung werden versauernde und ozonabbauende Substanzen freigesetzt, was das hohe Einsparpotenzial bei Versauerung und Ozonabbau erklärt. Weiterhin benötigen Windräder und PV-Anlagen im Vergleich zur Produktion von Biogas als Teil des durchschnittlichen Strommixes eine kleinere Fläche. Einsparungen beim Phosphat-Fußabdruck können bei der Nutzung von Photovoltaik-Strom nicht erzielt werden, da für das Ätzen der Solarzellen Phosphorsäure benötigt wird. Dennoch überwiegen die positiven Aspekte der Nutzung erneuerbaren Stroms deutlich.

Fazit

- Die Nutzung erneuerbaren Stroms kann die Umweltlast des Poloshirts signifikant reduzieren. Diese Umweltvorteile können durch den Einsatz erneuerbarer Wärme noch zusätzlich deutlich vergrößert werden.
- Es sollten Maßnahmen entwickelt werden, wie in allen Teilbereichen entlang der gesamten Textilkette zukünftig verstärkt erneuerbare Energieträger eingesetzt werden können.

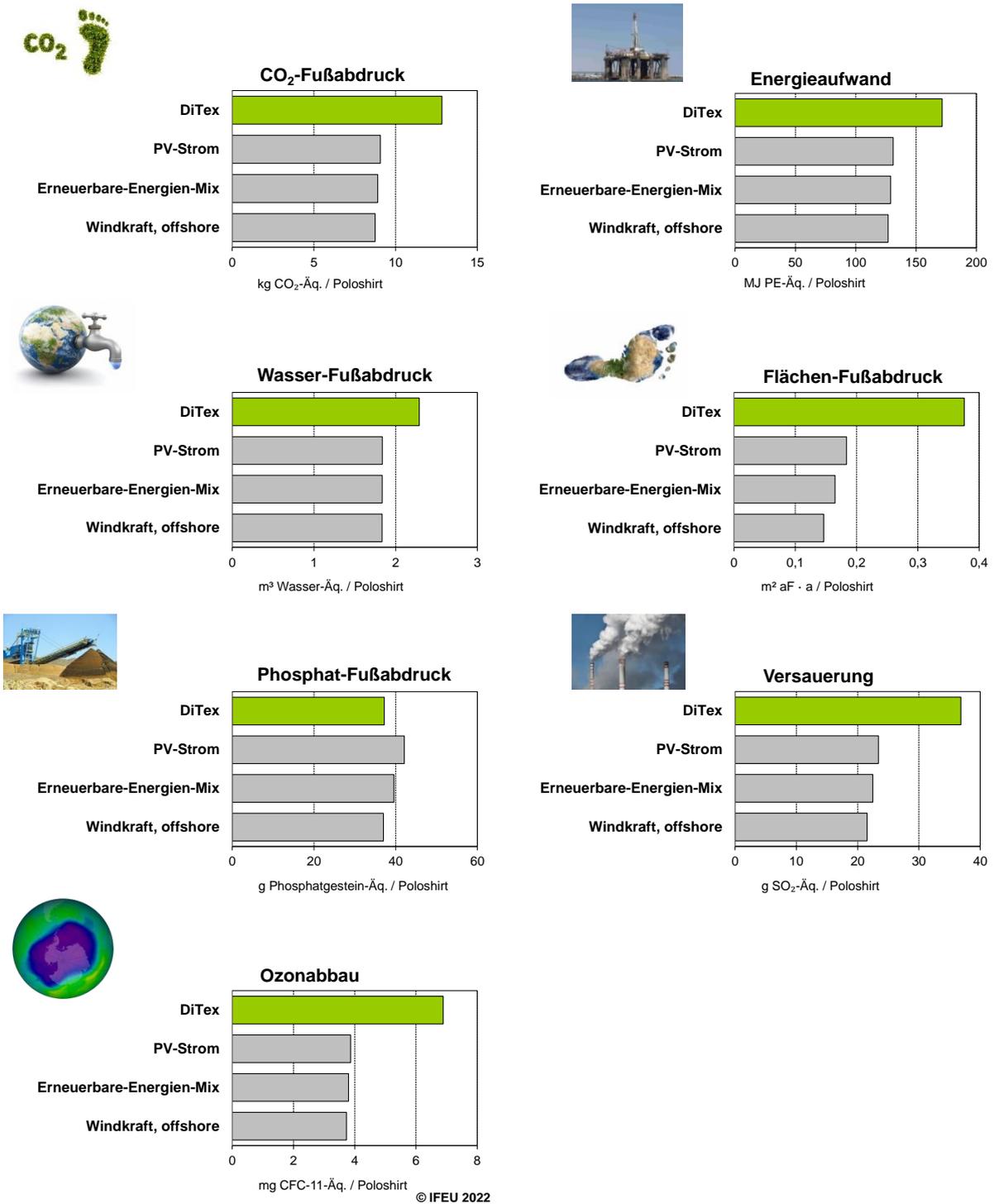


Abbildung 3.10: Umweltwirkungen des DiTex-Poloshirts bei Nutzung unterschiedlicher erneuerbarer Energieträger im Vergleich. Betrachtete Szenarien siehe Text, Einheiten in Kapitel 2.3. Bildquellen siehe ⁶

⁶ CO₂-Fußabdruck: © Jenny_Sturm – stock.adobe.com, Energieaufwand: © Jenny_Sturm – stock.adobe.com, Wasser-Fußabdruck: © corund – stock.adobe.com, Flächen-Fußabdruck: © Creativemarc / Fotolia, Phosphat-Fußabdruck: © fannyes / Fotolia, Versauerung: © kamilpetran / Fotolia, Ozonabbau: © NASA – Wikimedia Commons

4 Zusammenführung und Schlussfolgerungen

Aus den Ergebnissen der Übersichtsökobilanz, die in diesem Bericht zusammengestellt sind, lassen sich folgende Kernaussagen ableiten:

- Die **höchsten** Umweltentlastungen beim Poloshirt lassen sich vor allem erzielen durch:
 - Einen möglichst hohen Anteil an Recycling-Polyester bei gleichzeitig niedrigem Baumwoll-Anteil.
 - Die Erhöhung der Lebensdauer (Anzahl der Nutzungszyklen) des Poloshirts.
- **Weitere** Umweltentlastungen können durch Steigerung von Energie- und Ressourceneffizienz bei einigen Prozessen entlang der gesamten Textil-Prozesskette, insbesondere beim Waschen, erzielt werden. Dazu gehören insbesondere:
 - Das Ersetzen veralteter Waschstraßen, Trockner und Finisher durch energieeffiziente Anlagen sowie die Schulung des Wäschereipersonals zur optimierten Prozessführung.
 - Der Austausch von phosphorhaltigen Waschsubstanzen durch gleichwertige Chemikalien in den Wäschereien.
 - Der Einsatz von nachhaltigen erneuerbaren Energieträgern vor allem in energieintensiven Prozessen entlang des gesamten Lebenswegs wie Spinnen, Weben, Waschen und Trocknen.
- Andere Teilbereiche entlang des Lebensweges eines Poloshirts spielen hingegen nur eine **untergeordnete Rolle** zur Reduktion der Umweltlasten. Dazu gehören unter anderem:
 - Die Nutzung von Recycling-Polyester als Alternative zu Polyester aus fossilem Primärmaterial. Insgesamt gesehen ist Textil-Recycling ein essenzieller Baustein einer zukünftigen nachhaltigen, zirkulären Textilökonomie. Da keines der heute verfügbaren Recyclingverfahren ausgereift ist, ist weitere Entwicklungsarbeit notwendig, um das Textilrecycling effizienter und marktfähig zu machen. Wichtiger Bestandteil dieser Entwicklung ist, dass der für das Recycling benötigte Gesamtenergieaufwand nicht höher ist als derjenige für die Produktion von Primärfasern.
 - Die Höhe des Textilausschusses beim Recycling.
 - Die Art der Nutzung nicht anderweitig verwertbarer Alttextilien, etwa deren Verarbeitung zu Putztüchern oder deren energetische Verwertung.
 - Alle Transporte entlang der gesamten Textilprozesskette wie u. a. der Rohstofftransport (Baumwolle oder Gewebe), die Logistik für die Mietwäsche in der Praxis sowie die Logistik für das Textilrecycling.

5 Handlungsempfehlungen

Aus den Ergebnissen und Schlussfolgerungen der Übersichtsökobilanz von nachhaltigen, kreislauffähigen Poloshirts können folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet werden:

- Die Faserzusammensetzung von Textilien ist in Hinblick auf die Umweltlast von zentraler Bedeutung:
 - Ein möglichst hoher Anteil von Recycling-Polyester sollte angestrebt und dadurch der Anteil von Baumwolle reduziert werden.
- Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensdauer, also einer größeren Anzahl an Nutzungszyklen der Textilien, sollten identifiziert und umgesetzt werden.
- Produktions- und Wäschereiprozesse sollten möglichst energie- und ressourceneffizient umgesetzt werden. Dazu gehören insbesondere:
 - Der zügige Austausch veralteter Wasch- und Trocknungstechniken in Wäschereien gegen energieeffiziente Anlagen.
 - Der Energiebedarf sollte über nachhaltige erneuerbare Energieträger gedeckt werden, insbesondere für die energieintensiven Prozesse in der Textilproduktion, in der Wäscherei und beim Recycling.
 - Phosphorhaltige Waschhilfsmittel sollten durch gleichwertige Substanzen ohne Phosphor ersetzt werden.
 - Schulungen des Wäscherei-Personals zu Nachhaltigkeit und optimierter Prozessführung sollten angeboten werden.
- Textilrecyclingverfahren zum Recycling von Polyester-Textilien sollten unter den Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit sowie der Ressourcen- und Energieeffizienz weiterentwickelt werden.



© pixindy – stock.adobe.com

6 Literaturverzeichnis

- Boulay, A.-M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuilière, M. J., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Núñez, M., Pastor, A. V., Ridoutt, B., Oki, T., Worbe, S., Pfister, S. (2018): The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 23, No.2, pp. 368–378.
- Ecoinvent (2020): Ecoinvent database V3.7.1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Schweiz.
- Fehrenbach, H., Rettenmaier, N., Reinhardt, G., Busch, M. (2019): Festlegung des Indikators für die Bilanzierung der Ressource Fläche bzw. Naturraum in Ökobilanzen. In: *ifeu papers*, 02/2019. IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg. www.ifeu.de/ifeu-papers/.
- Gärtner, S., Haertlé, S., Reinhardt, G., Senn, J. (2022): Ökobilanz von nachhaltigen, kreislauffähigen Businesshemden. In: *Materialband von DiTex - Digitale Technologien als Enabler einer ressourceneffizienten kreislauffähigen B2B-Textilwirtschaft*, Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe (ReziProK)“ des BMBF im Förderschwerpunkt FONA, IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg, Deutschland. <https://www.ifeu.de/publikation/ditex-oekobilanz-hemd/>.
- Gärtner, S., Reinhardt, G., Senn, J. (2022): Ökobilanz von nachhaltiger, kreislauffähiger Bettwäsche. In: *Materialband von DiTex - Digitale Technologien als Enabler einer ressourceneffizienten kreislauffähigen B2B-Textilwirtschaft*, Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe (ReziProK)“ des BMBF im Förderschwerpunkt FONA, IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg, Deutschland. <https://www.ifeu.de/publikation/ditex-oekobilanz-bettwaesche/>.
- Gärtner, S., Reinhardt, G., Senn, J., Grehl, C. (2022): Ökobilanz von nachhaltigen, kreislauffähigen Poloshirts. In: *Materialband von DiTex - Digitale Technologien als Enabler einer ressourceneffizienten kreislauffähigen B2B-Textilwirtschaft*, Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe (ReziProK)“ des BMBF im Förderschwerpunkt FONA, IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg, Deutschland. <https://www.ifeu.de/publikation/ditex-oekobilanz-poloshirt/>.
- ifeu (2022): Kontinuierlich aktualisierte interne ifeu-Datenbank. IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg.
- IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ISO (2021a): ISO 14040:2021 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- ISO (2021b): ISO 14044:2021 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.
- Kamm, F. (2022): Persönliche Mitteilung.
- Müller, R., Vogel, C., Schmidt, S., Rubik, F., Müller, M., Nebel, K., Gerbig, M., Boldrini, B., Budde, I., Kamm, F., Witteveen, M., Ridder, C., Lang, S., Hecht, K., Jung, J., Gerhardts, A., Reinhardt, G., Zinke, C., Gärtner, S. (2021): Zirkuläre Bettwäsche und Berufskleidung für Gesundheitswesen und öffentliche Hand – Anforderungen und Nachhaltigkeitseffekte. In: *Integrativer Forschungsbericht im BMBF-Vorhaben: Digitale Technologien als Enabler einer ressourceneffizienten kreislauffähigen B2B-Textilwirtschaft (DiTex)*, Wilhelm Weishäupl - Hans Peter Weishäupl e. K.; Dibella GmbH; Hochschule Reutlingen, Fakultät Textil und Design; Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH; IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Bonn, Deutschland.
- Reinhardt, G., Rettenmaier, N., Vogt, R. (2019): Festlegung des Indikators für die Bilanzierung der Ressource Phosphat in Umweltbewertungen. In: *ifeu papers 01/2019*, IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg. www.ifeu.de/ifeu-papers/.
- Senn, J., Reinhardt, G., Gärtner, S. (2022): Ökologische Fußabdrücke von Baumwolle und Baumwollfasern. In: *ifeu papers 01/2022*. IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg. www.ifeu.de/ifeu-papers/.
- VTS (2021): Ressourceneffizienz - RessEff - Handbuch für die Praxis. Verband Textilpflege Schweiz VTS. <https://textilpflege.ch/service/umwelt/ressourceneffizienz/?L=0> (letzter Zugriff: 06/02/2022).

7 Anhang

Abbildung 7.1 und Abbildung 7.2 zeigen die detaillierten Lebenswegschemata des Referenz- und des DiTex-Poloshirts.

Referenz-Poloshirt

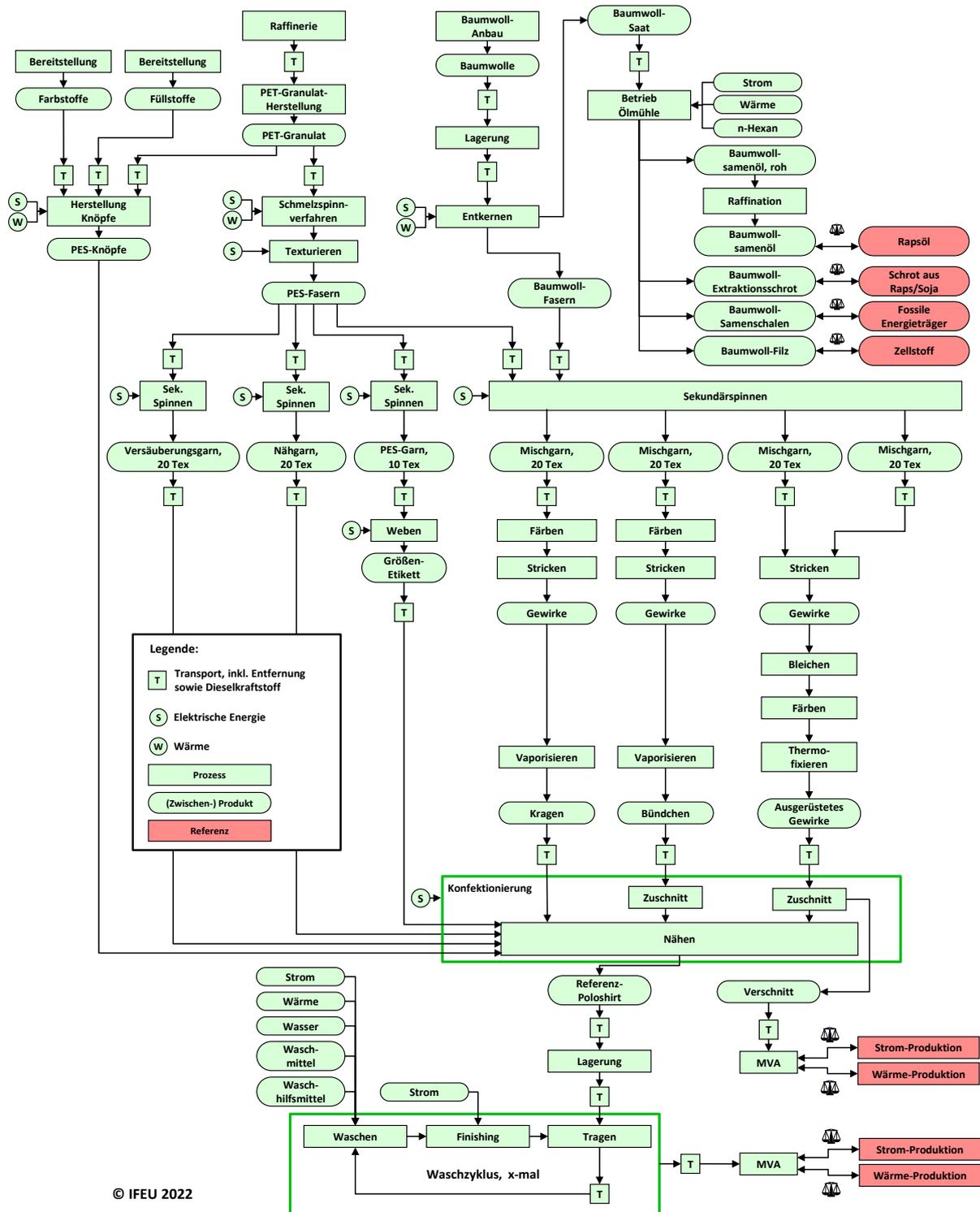


Abbildung 7.1: Lebenswegschemata des Referenz-Poloshirts.

DiTex-Poloshirt

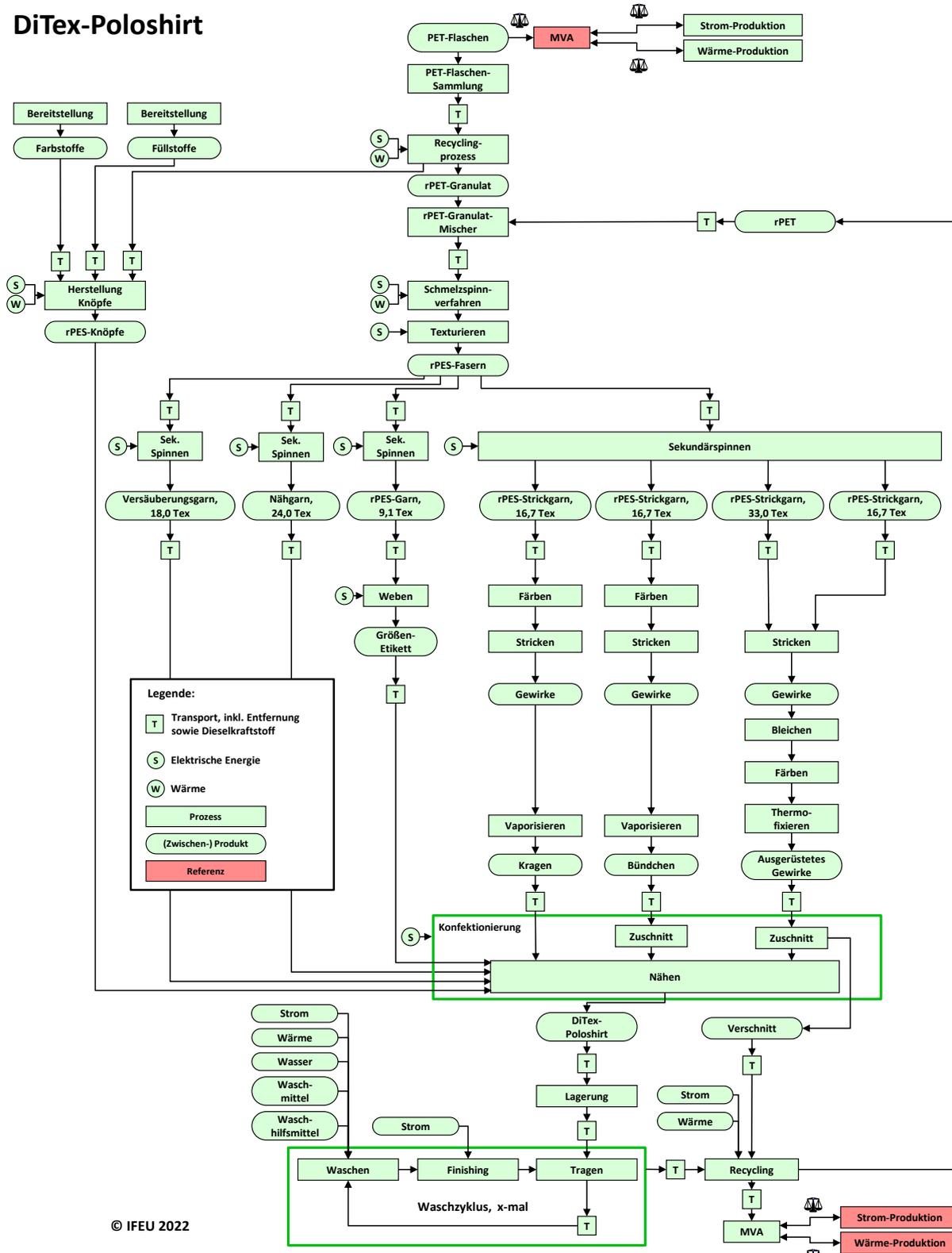


Abbildung 7.2: Lebenswegschemata des DiTex-Poloshirts.



DiTex

DITEX-KREISLAUFWIRTSCHAFT.DE