



Masterarbeit
**„Analyse der Lebenszyklus-Umweltwirkungen einer
Jeanshose“**

Luisa Kühn

Hochschule Bochum, SoSe 2020, Studiengang Angewandte Nachhaltigkeit

Weitere Abschlussarbeiten zum Thema Nachhaltigkeit finden Sie unter
Infocenter auf CSR Kompetenzzentrum Textil und Bekleidung
<https://www.csr-textil-bekleidung.de/>



Masterarbeit:

„Analyse der Lebenszyklus-Umweltwirkungen einer Jeanshose“

Erstprüfer: Herr Prof. Dr. Jan Paul Lindner

Zweitprüferin: Frau Lavinia Muth (M.A.)

Luisa Kühn



Studiengang: Angewandte Nachhaltigkeit

4. Fachsemester, Sommersemester 2020

Abgabedatum: 05.03.2020

Executive Summary

The global jeans industry causes extensive ecological consequences due to its substantial sales volume of an estimated 71 billion US dollars in 2020 and the associated high production volumes.¹ According to the current state of research, the main causes are the high consumption of water, chemicals and energy as well as the large amount of land required for the cultivation of natural fibers.² Consumers' desire for more information from manufacturers about product-related environmental impacts is growing continuously as their level of knowledge increases simultaneously, so that retailers and producers are faced with growing pressure to act.³

Against this background, the present study serves to generate reliable data on the ecological effects of jeans produced by the sustainable clothing company ARMEDANGELS (AA). The study is being conducted in cooperation with the company in order to be able to make reliable statements on the ecological consequences of the object of investigation for marketing communication purposes. Since the target group of AA shows a high affinity for the topic of sustainability, ongoing product optimization in this regard is essential. Therefore, the second focus of this thesis is the investigation of ecological weaknesses (hotspot analysis) along the entire product life cycle. In addition, the after-sale use phase is subjected to a separate examination in order to give consumers an impression of their own influence on the environmental impact of their jeans.

In order to meet this objective, the elaboration of a life cycle assessment (LCA) was chosen as a methodological approach. All material flows that are required for the production of jeans (inputs, e.g. energy, water and raw materials) are opposed to the products that arise (outputs, including the intended main and by-products, but also emissions, effluents and waste). The flows that leave the product system and are thus released into the environment are associated with impact categories and weighted by characterization factors. From the resulting findings, an estimation of the environmental impact can be derived.⁴ The corresponding international standards DIN EN ISO 14040 and 14044 serve as a reference framework for determining the appropriate procedure for preparing this life cycle assessment.⁵ Additionally, the product-related guidelines for the preparation of an Environmental Product Declaration (EPD) for trousers are being used.⁶ The present analysis therefore covers all steps in the product life cycle of a jeans (cradle-to-grave) from fiber extraction, spinning, dyeing, weaving, sewing and

¹ Vgl. Garcia, B. (2015), S. 405; Pal, H./ et. al. (2017), S. 111; Statista (2018), S. 12.

² Vgl. Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 527; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 126.

³ Vgl. Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 83; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 126.

⁴ Vgl. Textile Exchange (2014), S. 12; Muthu, S. (2015), S. 275; DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 10.

⁵ Vgl. DIN EN ISO 14040: 2009-11; DIN EN ISO 14044:2018-05.

⁶ Vgl. EPD International AB (2019).

finishing, as well as transport and distribution of the product. The subsequent use phase and product disposal (EoL) are also included.⁷

The target value was defined as taking into account all processes that cause more than 1% of the estimated environmental impact of the respective product life cycle phase. A women's jeans in size 27/32, available to the customer for 191 use cycles, was defined as a functional unit that reflects the performance of the product system together with the reference flow. The needed consumption data was collected at the sites in the supply chain. Incomplete or missing data sets for precursors are re-modeled on the basis of customary production processes in the industry or alternatively estimated on the basis of chemical and physical principles such as stoichiometry and calculation of the change in thermal energy.

In the context of life cycle inventory the collected data is then combined with the help of the life cycle assessment software GaBi from Thinkstep GmbH to form a coherent overall model that is evaluated based on the selected impact categories global warming potential, acidification potential and eutrophication potential as well as land use and water scarcity.

Accordingly, the driving factors of the various harmful environmental impacts are mainly in cotton cultivation, weaving preparation (including dyeing), production and finishing as well as in the use phase. In the detailed analysis, six model-related conspicuous features were identified, which are subjected to a sensitivity analysis for further examination, together with the risk-related assumptions from the inventory modeling. The cases derived from this analysis are related to the power consumption of indigo synthesis, the modeling of solvent recovery in the production of sodium dithionite and etidronic acid, the further use of ammonia in the manufacturing of sodium persulphate, as well as the washing habits in the use phase and the disposal options at the end of the product's life.

These aspects were compared with justified alternative models in order to assess the effects of a possible misjudgment and to obtain possible improvements for the original model. This sensitivity analysis shows that the range of variation is highest for indigo, etidronic acid and washing habits, and that modeling variants have the greatest impact on the overall result.

According to the final result, including the optimization approaches, 15.81 kg CO₂-equivalent are emitted over the entire product life cycle of AA jeans. The climate-related hotspots are in weaving preparation, production and finishing, as well as in use phase. Since these ecological weak points are identical to those aspects that showed the highest fluctuation range in the sensitivity analysis, their extent must be reconsidered. In the impact category land use, almost the entire influence can be attributed to cotton cultivation. The results of the study further show that the main focus of acidification po-

⁷ Vgl. Amutha, K. (2017), S. 28.

tential, eutrophication potential and water scarcity is on cotton cultivation, weaving preparation, production and finishing, and the use phase. Within the limitations described, the four phases mentioned above can thus be attributed to a central importance for the life cycle environmental impacts of the examined jeans.

The interpretation of the final results leads to various recommendations for A. It has been shown that a mixture of the used organic cotton fibers with e.g. 50 % linen can significantly reduce the problem of high land occupation and water consumption. The ecological relevance of production and finishing in the area of climate change could be considerably reduced by switching to renewable energies, as the total CO₂-emissions of jeans would be declined by 8.2%. This alone could save 102 t CO₂-equivalent annually, only for the jeans produced for AA. With regard to the consideration of the use phase required in the objective, it was confirmed that the influence of the end consumer can change the overall emission profile of the product. The intended communication approach of AA to sensitize customers to the subject of washing habits is thus supported by the analysis. The collected data can be used to communicate the environmental impact of jeans, so that the central objective of the present thesis could be achieved. However, a comparative statement is not recommended, as the consulted studies are based on very different assumptions and a comparison is therefore inadequate.

Overall, the present thesis highlights the practical application potential of LCA as a supporting tool for decision-making in companies.

Zusammenfassung

Die globale Jeansindustrie verursacht aufgrund ihres beachtlichen Umsatzvolumens von schätzungsweise 71 Milliarden US-Dollar im Jahr 2020 und den damit einhergehenden hohen Stückzahlen produzierter Jeans weitreichende ökologische Folgen.⁸ Laut aktuellem Stand der Forschung sind hierfür der hohe Verbrauch von Wasser, Chemikalien und Energie sowie der hohe Flächenbedarf für den Anbau natürlicher Fasern ursächlich.⁹ Der Wunsch der Konsumenten nach mehr Informationen der Hersteller über die produktbezogenen Umweltwirkungen steigt kontinuierlich mit deren zunehmenden Kenntnisstand darüber, sodass Händler und Produzenten mit einem wachsenden Handlungsdruck konfrontiert sind.¹⁰

Vor diesem Hintergrund dient die vorliegende Untersuchung der verlässlichen Datengenerierung zu den ökologischen Auswirkungen einer Jeans des nachhaltigen Bekleidungsunternehmens ARMEDANGELS (AA). Die Studie wird in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen durchgeführt, um für deren Marketingkommunikation belastbare Aussagen zu den ökologischen Folgen des Untersuchungsgegenstands treffen zu können. Da die Zielgruppe von AA eine hohe Affinität für das Thema Nachhaltigkeit vorweist, ist eine fortlaufende dahingehende Produktoptimierung unerlässlich. Aufgrund dessen liegt der zweite Schwerpunkt dieser Abschlussarbeit in der Untersuchung von ökologischen Schwachstellen (Hotspot-Analyse) entlang des gesamten Produktlebenszyklus. Darüber hinaus wird die nach dem Kauf stattfindende Gebrauchsphase einer gesonderten Prüfung unterzogen, um den Konsumenten einen Eindruck für die eigene Einflussmöglichkeit auf die Umweltwirkungen ihrer Jeans vermitteln zu können.

Um dieser Zielsetzung gerecht zu werden, wurde die Erstellung einer Ökobilanz als methodisches Vorgehen gewählt. Dabei werden alle Stoffströme, die für die Herstellung der Jeans benötigt werden (Inputs, z. B. Energie, Wasser und Rohstoffe), den jeweils entstehenden Produkten gegenübergestellt (Outputs, u. a. die beabsichtigten Haupt- sowie Nebenprodukte, aber auch Emissionen, Abwässer und Abfälle). Diejenigen Ströme, die das Produktsystem verlassen und damit in die Umwelt abgegeben werden, sind Wirkungskategorien zugeordnet und werden mit Hilfe von Charakterisierungsfaktoren gewichtet. Aus den resultierenden Ergebnissen lässt sich eine Abschätzung der Umweltwirkung ableiten.¹¹ Zur Ermittlung der adäquaten Vorgehensweise bei der Erstellung dieser Ökobilanz dienen die entsprechenden internationalen Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 als Bezugsrahmen.¹² Ergänzend wird

⁸ Vgl. Garcia, B. (2015), S. 405; Pal, H./ et. al. (2017), S. 111; Statista (2018), S. 12.

⁹ Vgl. Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 527; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 126.

¹⁰ Vgl. Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 83; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 126.

¹¹ Vgl. Textile Exchange (2014), S. 12; Muthu, S. (2015), S. 275; DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 10.

¹² Vgl. DIN EN ISO 14040: 2009-11; DIN EN ISO 14044:2018-05.

der produktbezogene Leitfaden zur Erstellung einer Environmental Product Declaration (EPD) im Bereich Hosen herangezogen.¹³ Die vorliegende Analyse umfasst demnach alle Schritte im Produktlebenszyklus einer Jeans (Cradle-to-Grave¹⁴) von der Fasergewinnung, der Spinnerei, der Färberei, über die Weberei, die Näherei und das Veredeln sowie den Transport und den Vertrieb des Produkts. Die anschließende Gebrauchsphase und die Produktentsorgung (EoL) sind ebenfalls eingeschlossen.¹⁵ Als Zielgröße wurde dabei definiert alle Prozesse zu berücksichtigen, die mehr als 1 % der abgeschätzten Umweltwirkung des jeweiligen Produktlebensabschnitts verursachen. Als funktionelle Einheit, welche die Leistung des Produktsystems zusammen mit dem Referenzfluss widerspiegelt, wurde eine Damen-Jeans in Größe 27/32, die der Kundin über 191 Gebrauchszyklen zur Verfügung steht, definiert. Die zu erhebenden Verbrauchsdaten wurden standortbezogen für die Betriebe der Lieferkette erfasst. Unvollständige oder fehlende Datensätze für Vorprodukte werden anhand der industriüblichen Produktionsverfahren nachmodelliert oder alternativ anhand chemischer und physikalischer Grundlagen, wie der Stöchiometrie und der Berechnung der Änderung der Wärmeenergie, abgeschätzt. Die erhobenen Daten werden dann im Rahmen der Inventarmodellierung mit Hilfe der Ökobilanzierungssoftware GaBi der Thinkstep GmbH zu einem aufeinander aufbauenden Gesamtmodell zusammengesetzt und anschließend anhand der gewählten Wirkungskategorien Klimawandel, Versauerungs- und Eutrophierungspotential sowie Flächennutzung und Wasserverknappung ausgewertet.

Demnach liegen die Treiberfaktoren der verschiedenen schädlichen Umweltwirkungen vorwiegend im Baumwollanbau, in der Webereivorbereitung (u. a. Färberei), der Fertigung und Veredelung sowie in der Gebrauchsphase. Bei der detaillierten Analyse wurden sechs modellbedingte Auffälligkeiten festgestellt, die im Folgenden gemeinsam mit den risikobehafteten Annahmen aus der Inventarmodellierung zur weiteren Prüfung einer Sensitivitätsanalyse unterzogen werden. Die hieraus abgeleiteten Fälle betreffen den Stromverbrauch der Indigosynthese, die Modellierung der Rückgewinnung von Lösungsmitteln bei der Herstellung von Natriumdithionit und Etidronsäure, die Weiterverwendung von Ammoniak bei der Produktion von Natriumpersulfat sowie die Waschgewohnheiten in der Gebrauchsphase und die Entsorgungsmöglichkeiten am Produktlebensende. Diese Aspekte wurden mit jeweils begründeten alternativen Modellierungen verglichen, um die Auswirkungen einer Fehleinschätzung beurteilen und daraus resultierende Verbesserungsmöglichkeiten für das ursprüngliche Modell ableiten zu können. Aus dieser Sensitivitätsanalyse geht hervor, dass die Schwankungsbreite beim Indigo, der Etidronsäure und den Waschgewohnheiten am höchsten ausfällt und sich

¹³ Vgl. EPD International AB (2019).

¹⁴ In der deutschen Übersetzung: von der Wiege bis zur Bahre.

¹⁵ Vgl. Amutha, K. (2017), S. 28.

Modellierungsvarianten entsprechend am stärksten auf das Gesamtergebnis auswirken.

Gemäß des finalen Endergebnisses, inklusive der eingeflossenen Optimierungsansätze, werden über den gesamten Produktlebenszyklus der AA-Jeans 15,81 kg CO₂-Äquivalent ausgestoßen. Die klimabezogenen Hotspots liegen dabei in der Webereivorbereitung, der Fertigung und Veredelung sowie dem Gebrauch. Da diese ökologischen Schwachpunkte identisch zu jenen Aspekten sind, die in der Sensitivitätsanalyse die höchsten Schwankungsbreiten vorgewiesen haben, muss deren Ausprägung relativiert werden. In der Wirkungskategorie Flächenbedarf ist nahezu der gesamte Einfluss auf den Baumwollanbau zurückzuführen. Das Ergebnis der Untersuchung zeigt zudem, dass die Schwerpunkte des Versauerungs- und Eutrophierungspotentials sowie der Wasserknappheit im Baumwollanbau, der Webereivorbereitung, der Fertigung und Veredelung sowie in der Gebrauchsphase liegen. Den insgesamt vier genannten Phasen kann somit im Rahmen der beschriebenen Einschränkungen eine zentrale Bedeutung für die Lebenszyklus-Umweltwirkungen der untersuchten Jeans zugeschrieben werden.

Aus der abschließenden Interpretation der finalen Ergebnisse gehen für AA verschiedene Handlungsempfehlungen hervor. Es konnte gezeigt werden, dass eine Mischung der eingesetzten Biobaumwollfasern mit z. B. 50 % Leinen die Problematik des hohen Flächen- und Wasserverbrauchs deutlich vermindern kann. Die ökologische Relevanz der Fertigung und Veredelung im Bereich Klimawandel ließe sich mit einem Umstieg auf erneuerbare Energien signifikant reduzieren, da die gesamten CO₂-Emissionen der Jeans um 8,2 % sinken würden. Damit könnten allein bei den für AA produzierten Jeans jährlich 102 t CO₂-Äquivalent eingespart werden. In Bezug auf die in der Zielsetzung geforderte Betrachtung der Gebrauchsphase wurde bestätigt, dass der Einfluss der Endkonsumenten das gesamte Emissionsprofil des Produkts verändern kann. Der beabsichtigte Kommunikationsansatz von AA, die Kunden für das Thema Waschgewohnheiten zu sensibilisieren, wird somit von der Analyse gestützt. Die erhobenen Daten können zur Kommunikation der Umweltwirkung der Jeans verwendet werden, sodass die zentrale Zielsetzung der vorliegenden Thesis erreicht werden konnte. Allerdings wird von einer vergleichenden Aussage abgeraten, da die in Frage kommenden Vergleichsstudien auf stark abweichenden Annahmen beruhen und ein Vergleich somit verfälscht wird.

Insgesamt macht die vorliegende Abschlussarbeit das praktische Anwendungspotential der Ökobilanzierung als Entscheidungsunterstützung in Unternehmen deutlich.

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	II
Zusammenfassung	V
Inhaltsverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XII
1. Einleitung	1
1.1 Kontext	1
1.2 Fragestellung	2
1.3 Vorgehen	3
2. Praxishintergründe	5
2.1 Der Unterschied zwischen Denim und Jeans	5
2.2 Jeansproduktion unter ökologischen Gesichtspunkten	5
2.3 Zwischenfazit	13
3. Methodik Lebenszyklusanalyse (LCA)	14
3.1 Nutzen einer LCA	14
3.2 LCA Verfahren	15
3.3 Bezugsrahmen der vorliegenden Analyse	18
4. Stand der Forschung	21
4.1 Bekleidungsindustrie	22
4.2 Denimindustrie	22
4.3 Jeans Produkt	22
4.4 Gewebe	25
4.5 Faser	26
4.6 Zwischenfazit	27
5. Ökobilanz einer Jeans	28
5.1 Goal & Scope	28
5.1.1 Ziel	28
5.1.2 Produktbeschreibung	29
5.1.3 Produktsystembeschreibung und Systemgrenzen	30
5.1.4 Abschneidekriterien	34
5.1.5 Funktionelle Einheit und Referenzfluss	34
5.1.6 Allokationsverfahren	34
5.1.7 Wirkungskategorien	34

5.1.8 Datenerhebung	35
5.2 Inventaranalyse (LCI).....	37
5.2.1 Softwarebeschreibung	37
5.2.2 Inventarmodellierung	37
5.3 Wirkungsabschätzung (LCIA)	65
5.3.1 Wirkungskategorien und Relevanz	65
5.3.2 Vorläufiges Ergebnis	67
5.4 Interpretation und kritische Betrachtung	75
5.4.1 Sensitivitätsanalyse	75
5.4.2 Abschließendes Ergebnis	88
5.4.4 Interpretation Produktsystem	89
6. Fazit	93
Quellenverzeichnis.....	XV
Eidesstattliche Erklärung	XXXIII
Anhang	XXXIV

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Phasen einer Ökobilanz	16
Abb. 2:	Literaturübersicht Ökobilanzen zum Thema Jeans	21
Abb. 3:	Übersicht Wirkungskategorien Jeans-Ökobilanzen	23
Abb. 4:	Gegenüberstellung der Jeans-Ökobilanzen anhand der funktionellen Einheit mit Anzahl Wäschen und dem GWP-Ergebnis	24
Abb. 5:	Gegenüberstellung der Denim-Ökobilanzen anhand der funktionellen Einheit und dem GWP-Ergebnis	25
Abb. 6:	Übersicht Produktbestandteile des Untersuchungsgegenstands	29
Abb. 7:	Flowchart Lebenszyklus MAIRAA	30
Abb. 8:	Rope Dyeing Prozess	32
Abb. 9:	Tabellarische Aufstellung Wirkungskategorien	35
Abb. 10:	Tabellarische Input-Output-Übersicht Heizkraftwerk ORTA	39
Abb. 11:	Modellierung Heizkraftwerk in GaBi	40
Abb. 12:	Vorgehen bei der Modellierung von Chemikalien und deren Modellierung	41
Abb. 13:	In der Färberei eingesetzte Chemikalien	42
Abb. 14:	Berechnungsgrundlage der Änderung der Wärmeenergie	43
Abb. 15:	Modellierung textile Müllverbrennung in GaBi	47
Abb. 16:	In der Veredelung eingesetzte Chemikalien und deren Modellierung	51
Abb. 17:	Übersicht Modellierung Auto	57
Abb. 18:	Tabellarische Input-Output-Übersicht Gebrauchsphase	59
Abb. 19:	Modellierung Waschmittel in GaBi	60
Abb. 20:	Ergebnis Anteil GWP in % nach Lebenszyklusabschnitten	67
Abb. 21:	Ergebnis Anteil AP in % nach Lebenszyklusabschnitten	70
Abb. 22:	Ergebnis Anteil EP in % nach Lebenszyklusabschnitten	72
Abb. 23:	Treiberfaktoren innerhalb der Lebenszyklusabschnitte nach Wirkungskategorien	73
Abb. 24:	Gegenüberstellung von „Original“ vs. „Fall 1“ je Wirkungskategorie	76
Abb. 25:	Gegenüberstellung von Natriumdithionit im „Original“ vs. „Fall 2: 71%“ vs. „Fall 2: 97%“ je Wirkungskategorie	78
Abb. 26:	Gegenüberstellung „Original“ vs. „Fall 3: 31 %“ vs. „Fall 3: 71 %“ vs. „Fall 3: 97 %“ je Wirkungskategorie.....	79
Abb. 27:	Gegenüberstellung „Original“ vs. „Fall 4: Verbrennung Ammoniak“ vs. „Fall 4: Weiterverwendung Ammoniak“ je Wirkungskategorie	81
Abb. 28:	Gegenüberstellung Auswirkung der Washhäufigkeit auf das Gesamtergebnis ...	82
Abb. 29:	Gegenüberstellung „Original“ vs. „Fall 7: Alternative Flugmodellierung“	85

Abb. 30	Abweichungen im Gesamtergebnis gemäß Sensitivitätsanalyse	86
Abb. 31	Darstellung Endergebnis	88
Abb. 32	Hotspotanalyse & Verbesserungsvorschläge	89
Abb. 33	Gegenüberstellung MAIRAA (faded blue) vs. „Alternative mit 50% Leinen“	90
Abb. 34	Gegenüberstellung MAIRAA (faded blue) vs. „Alternative mit erneuerbaren En- ergien bei Denim Authority“	91

Abkürzungsverzeichnis

AA	ARMEDANGELS
ABW	Abfallwirtschaftsbetriebe
AF & PA	American Forest & Paper Association
AP	Acidification Potential
AT	Austria, Österreich
BASF	Badische Anilin und Sodafabrik
BCI	Better Cotton Initiative
BVSE	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.
BVT	Beste verfügbare Technologie
CMT	Cut-Make-Trim
CN	China
CO	Cotton, Baumwolle
CO ₂ -eq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
CSR	Corporate Social Responsibility
DE	Deutschland
DIN	Deutsches Institut für Normung
dtex	Dezitex, Einheit für Garnstärke
dwt	Deadweight tonnage, Einheit für die Tragfähigkeit eines Schiffs.
EF	Environmental Footprint
ELCD	European Reference Life Cycle Database
EN	Europäische Norm
EoL	End-of-Life
EP	Eutrophication Potential
EPD	Environmental Product Declaration
ETP	Eco-Toxicity Potential
EU	Europäische Union
FTE	Full time equivalent
GHG	Greenhouse Gas
GLO	Global, weltweit

GOTS	Global Organic Cotton Standard
GWP	Global Warming Potential
HQ	Headquarter
HTP	Human Toxicity Potential
i.d.R	in der Regel
IEA	International Energy Agency, Internationale Energieagentur
ifeu	Institut für Energie und Umweltforschung
IMO	International Maritime Organization
ISO	International Organization for Standardization, Internationale Organisation für Normung
kbA	kontrolliert biologischer Anbau
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Lebenszyklusanalyse; engl. Life-cycle-assessment
LCI	Lifecycle Inventory, Inventarmodellierung
LCIA	Lifecycle Impact Assessment, Inventaranalyse
MSDS	Material Safety Data Sheets
n.R.	nicht relevant
NGO	Nicht-Regierungsorganisation; engl. Non-Governmental-Organisation
NO _x	Stickoxide
PCR	Product Category Rules
PE-LD	Polyethylene low density
PEFCR	Product Environmental Footprint Category Rules
PET	Polyethylenterephthalat
PGN	Phenylglycinnitril
PO ₄ ³⁻ -eq.	Phosphat-Äquivalent
POFP	Photochemical Oxidant Formation Potential
Pt.	Points (bei Land Use)
RER	Europa
SAC	Sustainable Apparel Coalition
SDG	Sustainable Development Goal
SO ₂ -eq.	Schwefeldioxid-Äquivalent
TN	Tunesien

TR	Türkei
ts	Thinkstep
USP	Unique Selling Point
vs.	versus
WSF	Water Scarcity Footprint

1. Einleitung

1.1 Kontext

Seit einigen Jahren rücken Umweltfragen und deren Lösung zunehmend in den Fokus der weltweiten Öffentlichkeit.¹⁶ Die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels und die damit verbundenen Effekte auf Umwelt und Menschen sind über den wissenschaftlichen Kontext hinaus mittlerweile sowohl in der Politik als auch in der gesellschaftlichen Diskussion weitgehend unbestritten.¹⁷ Das theoretische Konzept der „Planetary Boundaries“ untersucht in diesem Zusammenhang die Grenzen der Belastbarkeit unseres Planeten anhand von Wahrscheinlichkeiten für einschneidende Umweltveränderungen. Die Bereiche Phosphor- und Nitratbelastung, sowie der genetischen Diversität gelten demnach als besonders gefährdet. Bezogen auf die Faktoren Klimawandel und Flächenumwandlung besteht aktuell ein zunehmendes Risiko für unumkehrbare Veränderungen unserer Klima- und Ökosysteme.¹⁸ Beispielsweise nehmen Extremwetterereignisse wie Hitzewellen, Starkregen, Sturmfluten und Wirbelstürme bereits im globalen Maßstab zu, während die Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis weiter schwinden.¹⁹

Die Textil- und Bekleidungsindustrie leistet durch einen hohen Wasser-, Energie- und Chemikalienverbrauch sowie den Fasernbau in großflächigen Monokulturen mit entsprechendem Düngemittel- und Pestizideinsatz einen erheblichen Beitrag zu den genannten Problemfeldern.²⁰ Innerhalb der Bekleidungsbranche gehören Jeans zu den weltweit am häufigsten verkauften Produkten.²¹ Deutsche Frauen besitzen durchschnittlich 8,1 Jeanshosen, wovon jährlich 2,2 Exemplare gegen neue Modelle ausgetauscht werden.²² Unter Betrachtung der Emissionen von 33,4 kg CO₂-Äquivalent und 3.800 l verbrauchtem Wasser, die verteilt über den Lebenszyklus einer handelsüblichen Jeans anfallen, wird das Ausmaß der potentiellen Umweltbelastung deutlich.²³

Der Kenntnisstand der Konsumenten über diese Problematik nimmt aufgrund weitgehender Informationstechnologien und einer steigenden thematischen Relevanz, stetig zu. Die steigende Aufmerksamkeit der Konsumenten für die Thematik setzt die Händler und Produzenten zunehmend unter Handlungsdruck.²⁴ Eine schlüssige Nach-

¹⁶ Vgl. Periyasamy, A. P./ et. al. (2017), S. 83.

¹⁷ Vgl. S. 86; Stibbe, A. (2017), S.1; Ranke, U. (2019).

¹⁸ Vgl. Steffen, W./ et. al. (2015), S. 3 ff.

¹⁹ Vgl. Steffen, W./ et. al. (2015), S. 3 ff.; Ranke, U. (2019), S. 2.

²⁰ Vgl. Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 527; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 126.

²¹ Vgl. Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S: 126.

²² Vgl. Statista (2019a).

²³ Vgl. Levi Strauss & Co. (2015), S. 17.

²⁴ Vgl. Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 83; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 126.

haltigkeitsstrategie gilt dementsprechend in der Denimindustrie mittlerweile als wichtiger Baustein für anhaltendes Wachstum.²⁵ Branchenbezogene Fachzeitschriften wie die „Textilwirtschaft“ greifen das Thema auf und betiteln Ausgaben mit „Sustainability - Haltung, Engagement, Achtung - Wie ein neues Bewusstsein das Fashion-Business verändert“.²⁶ Der Trend wirkt sich ebenfalls auf die Markenwahl der Handelsunternehmen aus. Deren Einkäufer orientieren sich, laut einer aktuellen Befragung der „Textilwirtschaft“, bei der Wahl nachhaltiger Jeanslabels primär an Verminderungen des Energie-, Wasser- und Chemikalienverbrauchs.²⁷

Die nachhaltige Bekleidungsmarke ARMEDANGELS (AA), die ihr Jeanssegment stetig ausbaut und weiterentwickelt, stellt dieser Trend vor die Herausforderung einer verlässlichen Datenerhebung bezüglich der Umweltwirkungen der Produkte. In Kombination mit einem zunehmenden Umweltbewusstsein und Informationsbedürfnis der Endkonsumenten wird eine detaillierte Analyse der Verbrauchs- und Emissionswerte unumgänglich.

1.2 Fragestellung

Dieser Informationsnachfrage begegnet AA, mit der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit, indem Details über die ökologischen Auswirkungen eines Beispielprodukts erfasst werden. Das übergeordnete Thema dieser Thesis besteht folglich in der „Analyse der Lebenszyklus-Umweltwirkungen einer Jeanshose“.

Der erste Teil der konkreten Zielsetzung liegt, entsprechend der Problemstellung, in der Generierung belastbarer Daten über die Umwelteinflüsse eines ausgewählten AA Jeansmodells zu Kommunikations- und Marketingzwecken. Zusätzlich sollen die gewonnenen Informationen einem besseren Verständnis der Wertschöpfungskette und einer Analyse der ökologischen Hotspots dienen, um die Umweltbelastungen der Jeansherstellung in Zukunft weiter vermindern zu können. In diesem Sinne gilt: „You cannot manage, what you cannot measure“.²⁸ Da ein Produkt nur in seinem Gebrauchskontext als mehr oder weniger nachhaltig bezeichnet werden kann, beinhaltet der dritte Aspekt der Zielsetzung die Gegenüberstellung verschiedener Gebrauchsmuster.²⁹ Der Konsument soll durch diese Informationen für seinen eigenen Einfluss auf die Produktnachhaltigkeit sensibilisiert werden.

²⁵ Vgl. Paul, R. (2015), S. 11.

²⁶ Vgl. Textilwirtschaft (2019).

²⁷ Vgl. Statista (2019b).

²⁸ Stibbe, A. (2017), S. 1.

²⁹ Vgl. Laitala, K./ et. al.(2012), S. 228.

Zur Erhebung der genannten Daten und zur Analyse des Lebenszyklus wird als Methode die Erstellung einer Ökobilanz gewählt, da diese die Umweltauswirkungen eines Produkts umfassend untersucht und für die Fragestellung als Standardvorgehen gilt.³⁰

1.3 Vorgehen

Zur thematischen Einführung werden zunächst die Begriffe Denim und Jeans definiert und voneinander abgegrenzt. Anschließend werden die industrieeüblichen Produktionsverfahren beschrieben und nachhaltigere Alternativen aufgezeigt, um das nötige Verständnis für die Hotspot-Analyse zu schaffen, damit die eigenen Produktionsverfahren evaluiert und ggf. qualitative Verbesserungsvorschläge vorgenommen werden können. Aufgrund der in diesem Abschnitt vorgenommenen, detaillierten Beschreibung der ökologischen Auswirkungen der Jeansproduktion wird zudem die Relevanz der Thematik verdeutlicht.

Die Erläuterung des methodischen Vorgehens erfolgt im darauffolgenden Kapitel, indem der Nutzen, die Funktionsweise und der formale Ablauf einer Ökobilanz anhand der entsprechenden Normen aufgezeigt wird. Danach werden produktspezifische Regularien zur Modellierung vorgestellt, welche in der folgenden, eigens erstellten, Ökobilanz herangezogen werden.

Zum aktuellen Stand der Forschung werden vorhandene Lebenszyklusanalysen und wissenschaftliche Beiträge in Bezug auf die Jeansindustrie auf Basis ihrer Betrachtungsebenen (Bekleidungsindustrie, Denimindustrie, Jeans Produkt, Gewebe- und Faserebene) analysiert. Die Zielsetzung hierbei ist ein struktureller Abgleich der methodischen Vorgehensweise und die Erarbeitung von Benchmarks als Orientierungs- und Vergleichsgrößen für die eigene Bilanzierung.

Die eigentliche Ökobilanzierung des Jeansprodukts erfolgt in Übereinstimmung mit der vorgeschriebenen Vorgehensweise gemäß der Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 sowie in Anlehnung an die zuvor beschriebenen, produktspezifischen Richtlinien. Im ersten Schritt „Goal & Scope“ werden Rahmenbedingungen der Analyse festgelegt. Diese umfassen die Ziele der Bilanzierung, eine Produktbeschreibung, eine Beschreibung des Produktsystems inklusive Systemgrenzen, die Definition der funktionellen Einheit und des Referenzflusses, die verwendeten Allokationsverfahren und Wirkungskategorien, sowie die Beschreibung der Datenerhebung. Im Rahmen der Inventaranalyse wird die verwendete Software kurz beschrieben, um dann die Modellierung schrittweise im Detail zu erläutern. Zur Wirkungsabschätzung wird zunächst die Wahl der herangezogenen Wirkungsgrößen begründet, bevor die vorläufigen Ergebnisse der Ökobilanzierung anhand der vorgestellten Indikatoren präsentiert werden. Im

³⁰ Vgl. DIN EN ISO 14040: 2009-11, S. 4; Stibbe, A. (2017), S. 185; DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 7.

letzten Teil der Lebenszyklusanalyse, der Interpretation, werden zunächst getroffene Annahmen und ermittelte Auffälligkeiten aus den vorherigen Abschnitten zur näheren Erläuterung einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Das daraus entstehende Optimierungspotential wird in das ursprüngliche Modell übernommen, bevor in der eigentlichen Interpretation der Zusammenhang zu der dreigeteilten Zielsetzung geknüpft wird. Die Hotspot-Analyse wird unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Kapitel 1, über die ökologisch relevanten Aspekte der Denimindustrie, durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit den erarbeiteten Best-Practice-Ansätzen verglichen. Zudem werden Vorschläge für Kommunikationsansätze der erarbeiteten Daten unterbreitet, zu denen die Vermittlung des Einflusses der Gebrauchsphase zählt. Das abschließende Fazit bietet, neben einer kurzen Zusammenfassung der Ergebnisse, eine Benennung der Limitationen der Untersuchung, sowie einen weiterführenden Forschungsausblick.

2. Praxishintergründe

Zur Einführung in die Produktthematik der vorliegenden Arbeit, werden im folgenden Abschnitt die Begriffe Denim und Jeans in Abgrenzung zueinander definiert. Die Standardverfahren der Industrie werden unter besonderer Berücksichtigung ihrer ökologischen Aspekte erläutert, um anschließend Innovationen im Bereich Jeans und Denim vorzustellen. Auf Basis dessen wird in der *Interpretation* in Kapitel 5.4 der vorliegenden Arbeit der Lebenszyklus des analysierten Produkts evaluiert und Verbesserungspotentiale aufgezeigt.

2.1 Der Unterschied zwischen Denim und Jeans

Denim ist die Bezeichnung für ein Gewebe mit diagonaler Struktur aus indigogefärbtem Kettgarn und ungefärbtem Schussgarn, das mit einer 3/1 Köper-Bindung zusammengefügt wird.³¹ Der Stoff ist unter allen Altersgruppen, Geschlechtern und sozioökonomischen Schichten weit verbreitet. Die Vorteile des Denim-Gewebes liegen in der langen Haltbarkeit, Stabilität und modischen Zeitlosigkeit. Als Nachteile sind eine hohe Steifheit und Beschädigungen, die dem Gewebe während des Veredelungsprozesses zugefügt werden, zu nennen.³² Aus Denim-Gewebe werden u. a. Hosen hergestellt, die als Jeans bezeichnet werden.³³ Wird im Verlauf der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit der Begriff Jeansproduktion oder -industrie verwendet, schließt dieser die Denim-Produktion mit ein.

2.2 Jeansproduktion unter ökologischen Gesichtspunkten

Der globale Marktwert der Jeansindustrie beträgt bei einer jährlichen Produktion von rund 5 Milliarden Jeans schätzungsweise 66 Milliarden US-Dollar, woraus ein erhöhter Bedarf an Energie, Wasser und Chemikalien abgeleitet werden kann.³⁴ Eine Standardjeans verbraucht im Laufe ihres Produktlebenszyklus rund 3.800 Liter Wasser und verursacht 33,4 kg CO₂-Emissionen.³⁵ Durch eine Hochrechnung dieser Werte auf die Anzahl der produzierten Jeans, werden die daraus resultierenden Auswirkungen abschätzbar.

Die Herstellung einer Jeans umfasst die Fasergewinnung, die Spinnerei, das Färben, die Weberei, die Näherei, das Veredeln, den Transport und den Vertrieb des Produkts. Anschließend folgt die Gebrauchsphase und das Produktlebensende (End-of-Life

³¹ Vgl. Kühnl, S./ Hang, K. N. (2011), S. 114.

³² Vgl. Paul, R. (2015), S. 1; Amutha, K. (2017), S. 27.

³³ Vgl. Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 129.

³⁴ Vgl. Garcia, B. (2015), S. 405; Pal, H./ et. al. (2017), S. 111; Statista (2018), S. 12.

³⁵ Vgl. Levi Strauss & Co. (2015), S. 17.

(EoL)).³⁶ Die verschiedenen Abschnitte des Lebenszyklus werden im Folgenden näher beleuchtet. Während der Produktion verursachen insbesondere die Bereiche der Fasergewinnung, der Färberei und der Veredelung ökologische Konsequenzen auf die im nächsten Abschnitt ebenfalls genauer eingegangen wird.³⁷

Fasergewinnung:

Rund 20 % der globalen Baumwollproduktion wird für die Herstellung von Denim verwendet, welcher traditionell aus 100 % Baumwolle besteht.³⁸ Als meist verwendete natürliche Faser der Welt, werden 3 % des globalen Ackerlandes zur Kultivierung von Baumwolle genutzt.³⁹ Der Anbau umfasst die Schritte Bodenvorbereitung, Aussaat, Bewässerung, Düngung, Pestizideinsatz, Ernte und Entkörnung.⁴⁰ Dabei werden große Mengen an Wasser, Energie sowie Dünge- und Pflanzenschutzmitteln benötigt.⁴¹ Eine Meta-Studie bezüglich der humanitären Auswirkungen des Pestizideinsatzes in der Baumwollproduktion dokumentiert bei Feldarbeitern auftretende Beeinträchtigungen des Nervensystems, verspätete Pubertät, Kontamination von Muttermilch, Übelkeit, Atemprobleme, Benommenheit und Krämpfe.⁴² Die Kombination des hohen Pestizid- und Düngemittleinsatzes und der intensiven Bewässerung hat Verunreinigungen und Eutrophierung von Gewässern, Versalzung von Böden, Absinken des Grundwasserspiegels und die Zerstörung von natürlichen Habitaten zur Folge.⁴³ Häufig enthält Denim, neben Baumwolle noch synthetische Fasern, wie Polyester oder Elastan, um den Tragekomfort und die Haltbarkeit des Endprodukts zu verbessern. Trotz einer Reduktion der Anbaufläche und der benötigten Wassermenge, fallen im Kontext der Herstellung dieser Fasern, aufgrund des hohen Energiebedarfs, enorme Mengen an CO₂-Emissionen an.⁴⁴

Durch den Austausch der genannten beigemischten synthetischen Fasern aus Primärrohstoffen zu Gunsten recycelten Polyesters aus PET-Flaschen, Tencel™ Lyocell, Tencel™ Modal, Fasern aus Bambus, Hanf oder Leinen, kann eine Verminderung der ökologischen Auswirkungen der Faserproduktion erzielt werden.⁴⁵ Bei der Substitution von konventioneller Baumwolle durch zertifizierte Biobaumwolle wird der Einsatz gen-

³⁶ Vgl. Amutha, K. (2017), S. 28.

³⁷ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 578; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 128.

³⁸ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 565; Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 85.

³⁹ Vgl. Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 84.

⁴⁰ Vgl. McLoughlin J./ et. al. (2015), S. 16 f.

⁴¹ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 565; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 128.

⁴² Vgl. Ferrigno, S./ et. al. (2017), S. 4.

⁴³ Vgl. Amutha, K. (2017), S. 32.

⁴⁴ Vgl. Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 84 f.

⁴⁵ Vgl. Paul, R. (2015), S. 2; Pal, H./ et. al. (2017), S. 118; Sanko Tekstil Isletmeleri San. ve Tic. A.S. (2019), S. 1; Lenzing Aktiengesellschaft (o.J.).

modifizierter Pflanzen und synthetischer Agrarchemikalien verhindert.⁴⁶ Zur Verringerung des Wasserverbrauchs können moderne Landwirtschaftsmethoden wie Tröpfchenbewässerung oder Feuchtigkeitssensoren im Boden verwendet werden.⁴⁷

Spinnerei:

Vor dem eigentlichen Spinnvorgang werden die Faserballen in mehreren Schritten geöffnet, gereinigt, kardiert, ggf. gekämmt, gestreckt und parallelisiert. Anschließend wird das fertige Garn per Ringspinn-, Kompaktspinn- oder Rotorspinnmaschine versponnen und aufgespult.⁴⁸ Alle genannten Einzelprozesse benötigen Energie und erzeugen Staub, sowie Faser- und Garnabfälle.⁴⁹ In der Regel werden die entstandenen Garnabfälle unmittelbar wieder in den Prozess zurückgeführt.⁵⁰

Färberei:

Bei Denim-Stoffen wird ausschließlich das Kettgarn gefärbt, um im Webprozess die typische Zweifarbigkeit zu generieren.⁵¹ Zur Erzielung des gewünschten „Used Looks“ der Jeans, wird die Faser in der weiteren Verarbeitung ringgefärbt, sodass der Farbstoff das Garn nur ummantelt und der Kern unbehandelt bleibt.⁵²

Als Farbstoff wird in erster Linie der Küpenfarbstoff Indigo verwendet, welcher in manchen Fällen mit Schwefelfarbstoffen kombiniert wird.⁵³ Um den Indigofarbstoff im Wasser zu lösen, damit er sich an die Faser binden kann, ist ein starkes Reduktionsmittel erforderlich. Hierfür wird in der Regel Natriumhydrosulfit verwendet, das mit verschiedenen negativen Umweltauswirkungen in Verbindung gebracht wird.⁵⁴ Um ein optimales Färbeergebnis zu erreichen, werden außerdem verschiedene Chemikalien, wie Feuchthalte-, Wasch-, Entschäumungs-, Belüftungs- und Dispersionsmittel sowie Komplexbildner eingesetzt.⁵⁵ Der „rope-dyeing“ Färbeprozess verläuft in multiplen, aufeinanderfolgenden, identischen Schritten. Die Garne werden zunächst nebeneinander auf einer Schärtrommel aufgewickelt.⁵⁶ Daraufhin werden die Garne parallel durch

⁴⁶ Vgl. Paul, R. (2015), S. 2; McLoughlin, J./ et. al. (2015), S. 32, 34; Pal, H./ et. al. (2017), S. 117 f.

⁴⁷ Vgl. Pal, H./ et. al. (2017), S. 117 f.

⁴⁸ Vgl. McLoughlin, J./ et. al. (2015), S. 26 ff.

⁴⁹ Vgl. Periyasamy, A./ et. al.(2017), S. 87.

⁵⁰ Vgl. Wanassi, B./ Hassen, M. (2016), S. 27.

⁵¹ Vgl. McLoughlin, J./ et. al. (2015), S. 31.

⁵² Vgl. Kühnl, S./ Hang, K. N. (2011), S. 19; Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 566 f.

⁵³ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 566; Periyasamy, A./ et. al.(2017), S. 87.

⁵⁴ Vgl. Paul, R. (2015), S. 3; Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 570; Meksi, N./ Mhenni, M. F. (2015), S. 72 f.

⁵⁵ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 570 f.

⁵⁶ Vgl. Kühnl, S./ Hang, K. N. (2011), S. 57.

das Färbebad gezogen. Die reduzierte Leuko-Indigoform heftet sich an die Faser. Das Garn wird gelüftet, wodurch der Leuko-Indigo oxidiert und wasserunlöslich wird. Dieser Prozess wird fünf- bis achtmal wiederholt, bis das erwünschte Färbeergebnis eintritt.⁵⁷ Nach dem Färbeprozess werden lösliche Farbstoffreste ausgewaschen und das Garn getrocknet.⁵⁸ Durch die mehrmalige Färbung werden entsprechend hohe Mengen an Farbstoff, Hilfs- und Reduktionsmitteln benötigt.⁵⁹ All diese Chemikalien gelangen in das Abwasser und stellen somit ein potentiellies Umweltrisiko dar.⁶⁰ Aufgrund dessen sollte das Abwasser biologisch und physikalisch behandelt und möglichst in den Prozess zurückgeführt werden.⁶¹

Um die weiteren ökologischen Auswirkungen zu vermindern, gibt es innovative Alternativen zum konventionellen Indigo-Färbeprozess. Der synthetische Produktionsprozess von Indigo kann zirkulär optimiert und per katalytischer Hydrierung vorreduziert werden, sodass im Färbeprozess weniger Reduktionsmittel benötigt werden. Wird das übliche Indigopulver durch eine solche Indigolösung, z. B. „Dystar Indigo Vat 40 % Solution“ ersetzt, vermindert sich die Abwasserbelastung des Färbevorgangs.⁶² Der Indigofarbstoff kann außerdem mikrobiologisch statt synthetisch gewonnen werden.⁶³ Anstelle des Indigos können Natur- und Schwefelfarbstoffe eingesetzt werden.⁶⁴ Bei der Advanced Denim Technologie werden alternative Farbstoffe von Archroma mit einem neuartigen Färbeprozess verbunden. Der verwendete Schwefelfarbstoff wird in nur einem Färbebad, welches zusätzlich ein zuckerbasiertes Reduktionsmittel enthält, an das Textil gebunden. In der Oxidations- und Schlichte-Box wird der Schwefelfarbstoff anschließenden mit Hilfe von bi-kathodischen Wirkstoffen und Bindemitteln oxidiert. Laut Herstellerangaben verbraucht dieser Prozess 92 % weniger Wasser, 30 % weniger Energie und produziert 87 % weniger Textilabfall als konventionelle Färbung. Zudem entsteht keinerlei Abwasser.⁶⁵

Um den Wasserverbrauch des Färbeprozesses zu reduzieren kann der Farbstoff auch in Schaumform aufgetragen werden.⁶⁶ Die Dry-Indigo® Technologie des spanischen Unternehmens Tejidos Royo, die auf diesem Prinzip basiert, benötigt laut Unternehmen

⁵⁷ Vgl. Kühnl, S./ Hang, K. N. (2011), S. 128; Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 568.

⁵⁸ Vgl. Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 87.

⁵⁹ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 568; Paul, R. (2015), S. 3; Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 87; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 128.

⁶⁰ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 570 f.

⁶¹ Vgl. Paul, R. (2015), S. 9.

⁶² Vgl. Paul, R. (2015), S. 3; Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 568; Amutha, K. (2017), S. 41; DyStar Colours Distribution GmbH (2019), S. 26.

⁶³ Vgl. Chavan, R. B. (2015), S. 46 f.; Pal, H./ et. al. (2017), S. 119.

⁶⁴ Vgl. Paul, R. (2015), S. 3; Pal, H./ et. al. (2017), S. 118 f.; SGS (2019), S. 3.

⁶⁵ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 569; Paul, R. (2015), S. 3; Pal, H./ et. al. (2017), S. 119; Archroma Management GmbH (o.J.), S. 2.

⁶⁶ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 573; Zhu, M. (2019), S. 3.

keinerlei Wasser. Dementsprechend entsteht kein Abwasser; der Chemikalienverbrauch reduziert sich um 90 % und es wird 65 % weniger Energie benötigt.⁶⁷ Das starke synthetische Reduktionsmittel, das zur Erzeugung der wasserlöslichen Leuko-Indigoform benötigt wird, kann durch elektro-chemische Reduktion, katalytische Hydrierung oder organische Reduktionsmittel substituiert werden.⁶⁸

Weberei:

Zur Vorbereitung auf den Webprozess wird natürliche oder synthetische Schlichte auf das Kettgarn aufgetragen, um es vor übermäßiger mechanischer Beanspruchung zu schützen. Der Webprozess wird automatisiert auf Greifer-, Projektil- oder Luftdüsenwebmaschinen durchgeführt, die i. d. R. hohe Mengen an Energie benötigen.⁶⁹ Außerdem entstehen erneut Garnabfälle.⁷⁰ Nach dem Webprozess wird die Schlichte ausgewaschen und belastet anschließend das Abwasser maßgeblich. Hierbei sind 70 % des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) von Abwässern aus Denim-Fabriken ist auf Schlichtemittel zurückzuführen.⁷¹

Cut-Make-Trim (CMT):

Im abschließenden Produktionsschritt wird aus dem zweidimensionalen Denim-Gewebe das dreidimensionale Jeansprodukt. Dazu wird das Gewebe zunächst zugeschnitten, daraufhin in mehreren Schritten vernäht und zwischenzeitlich gebügelt. Die Nieten und Knöpfe werden gestanzt.⁷² Unter Umweltgesichtspunkten sind der Energiebedarf und der Gewebeverschnitt von 10-15 %, der beim Zuschnitt entsteht, zu beachten.⁷³ In Anbetracht der späteren Recyclingfähigkeit können auflösbare Fäden oder Laserschweißen zum Verbinden der Einzelteile genutzt werden.⁷⁴

Veredelung:

Nachdem die Jeans fertig genäht ist, folgt ein Veredelungsprozess. Dabei werden in verschiedenen Nass- und Trockenverfahren Teile des Indigofarbstoffs von der Jeans abgetragen, um den bereits erwähnten „Used Look“ zu erzeugen.⁷⁵ Beim Stonewash-Prozess werden die Jeans zusammen mit Bimssteinen, Bleich- und Waschmitteln in

⁶⁷ Vgl. Tejidos Royo S. L. (2018), S. 19; Aitex Textile Research Institute (2019).

⁶⁸ Vgl. Schönberger, H./ Schäfer, T. (2003), S. 347 f.; Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 571; Paul, R. (2015), S. 3.

⁶⁹ Vgl. Kühnl, S./ Hang, K. N. (2011), S. 228; Paul, R. (2015), S. 4.

⁷⁰ Vgl. Periyasamy, A./ et. al.(2017), S. 87.

⁷¹ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 574; Periyasamy, A./et. al.(2017), S. 87.

⁷² Vgl. Periyasamy, A./ et. al.(2017), S. 88.

⁷³ Vgl. Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 529; Periyasamy, A./ et. al.(2017), S. 88.

⁷⁴ Vgl. Paul, R. (2015), S. 5.

⁷⁵ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 566 f.

speziellen Waschmaschinen behandelt. Die Bimssteine reiben dabei die oberste Indigo-Schicht von der Faseroberfläche und hellen die entsprechenden Stellen auf. Dabei wird zum einen mehr Energie als in herkömmlichen Waschprozessen verbraucht und zum anderen entstehen erneut belastete Abwässer.⁷⁶ Der Begriff „Microsanding“ beschreibt einen trockenen, mechanischen Finishingprozess, bei dem der Denim-Stoff über verschiedene, mit Schleifmittel beschichtete, Walzen gezogen wird, um die Oberfläche anzurauen und die Farbe zu mattieren. Die Abfälle des Schleifmaterials können die Umwelt verschmutzen. Chemische Wäschen, wie das Bleichen, benötigen Chemikalien, wie Natriumhypochlorit oder Kaliumpermanganat. Beides gilt als gesundheits- und umweltschädlich.⁷⁷ Des Weiteren werden manuelle mechanische Schritte mit Stahlbürsten, elektrischen Bürsten, Schleifpapier o. Ä. durchgeführt.⁷⁸

Nach der abschließenden Qualitätskontrolle werden die veredelten Jeans mit Hangtags versehen, verpackt und versendet. Produkte, die nicht den Qualitätskriterien entsprechen sowie Verpackungsmüll müssen anschließend entsorgt werden.⁷⁹

Um die Umweltauswirkungen des Veredelungsprozesses zu vermindern, können chemische Bleiche und Stonewashing durch verschiedene Enzymwäschen ersetzt werden.⁸⁰ Die verwendeten Enzyme für Stonewash-Effekte (Cellulasen) greifen die Gewebeoberfläche über biochemische Reaktionen an, ohne dabei die Fasern zu überlasten.⁸¹ Laccase-Enzyme oxidieren Indigo in lösliche Abbauprodukte, sodass ein partiell aufhellender Effekt eintritt.⁸² Die verwendete Wassermenge und Energie, sowie die anfallenden Abwässer und Maschinenschäden fallen deutlich geringer aus als bei konventionellen Prozessen.⁸³ Eine alternative Verbesserung des Stonewash-Prozesses kann durch die Substitution der Bimssteine durch Siliziumgestein oder künstliche „Steine“ aus Kunststoff erreicht werden.⁸⁴ Neue Trockenverfahren zum Jeansfinish, wie Laserbehandlung, Ozonwäsche und Dry-Ice-Blasting eliminieren den Chemikalien- und Wasserverbrauch des Veredelungsprozesses fast gänzlich.⁸⁵ Durch den Einsatz von Infrarot-Lasersystemen können lokaler Farbabrieb und gezielte Stoffbrüche in verbesserter Reproduzierbarkeit und Qualität erzeugt werden. Die Ozonwäsche nutzt

⁷⁶ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 575; Paul, R. (2015), S. 6; Amutha, K. (2017), S. 40; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 128.

⁷⁷ Vgl. Kühnl, S./ Hang, K. N. (2011), S. 61; Amutha, K. (2017), S. 40.

⁷⁸ Vgl. Kühnl, S./ Hang, K. N. (2011), S. 122, 181.

⁷⁹ Vgl. Periyasamy, A./et. al.(2017), S. 88.

⁸⁰ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 575; Paul, R. (2015), S. 6; Zhu, M. (2019), S. 3.

⁸¹ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 575.

⁸² Vgl. Paul, R. (2015), S. 6.

⁸³ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 575.

⁸⁴ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 575; Amutha, K. (2017), S. 43.

⁸⁵ Vgl. Paul, R. (2015), S. 5,7; Pal, H./ et. al. (2017), S. 119; Amutha, K. (2017), S. 43.

die natürliche Oxidationswirkung von Ozongas für Bleicheffekte.⁸⁶ Als Alternative zu dem inzwischen weitgehend verbotenen Sandstrahlen mit Quarzsand, wird beim Dry-Ice-Blasting Trockeneis als Schleifmittel eingesetzt, um Arbeiter vor einer Inhalation der lungenschädigenden Partikel zu schützen.⁸⁷ Das auf nachhaltige Denim-Veredelung spezialisierte, spanische Unternehmen Jeanologica bietet neben den beschriebenen Trockenverfahren außerdem Anlagen zum Wasserrecycling und Software zur Abschätzung von Umweltauswirkungen des Veredelungsprozesses.⁸⁸

Transport:

In der Regel fallen zwischen allen genannten Produktionsschritten Transportwege in unterschiedlichem Ausmaß an. Häufig finden die verschiedenen Verarbeitungsstufen in mehreren Ländern oder sogar Kontinenten statt. Die daraus resultierenden Logistikleistungen per Schiff, Flugzeug und LKW verursachen zusätzliche Treibhausgasemissionen. Je verzweigter die Produktionskette und je länger die entsprechenden Transportwege, desto höher der resultierende Umweltschaden. Außerdem muss auch der Weg des Kunden zum Einzelhandel bei dieser Kalkulation miteinbezogen werden.⁸⁹

Gebrauch:

Deutsche tragen im Durchschnitt an 5,2 Tagen in der Woche eine Jeans.⁹⁰ Diese werden circa nach viermaligem Tragen gewaschen und insgesamt rund 3,7 Jahre genutzt.⁹¹ Der gewohnheitsmäßige Umgang mit Kleidung im Alltag beeinflusst die Nachhaltigkeit der Produktes maßgeblich, da hierbei aufgrund der häufigen Wiederholung in Summe erhebliche Mengen an Wasser, Energie und Chemikalien verbraucht werden.⁹²

Unter Betrachtung der Waschgewohnheiten müssen die Parameter der Waschtemperatur, die Art der Waschmaschine, das gewählte Waschprogramm und dessen Länge, sowie die Häufigkeit des Waschens zur Analyse herangezogen werden. Entsprechendes gilt auch für den Trocken- und Bügelvorgang.⁹³

Neben den Waschgewohnheiten des einzelnen Konsumenten, ist insbesondere die gesamte Länge der Nutzung für die Produktökologie entscheidend. Wird eine Jeans nur wenige Male getragen bis sie entsorgt wird, entfallen auf das Produkt anteilig

⁸⁶ Vgl. Pal, H./ et. al. (2017), S. 119; Zhu, M. (2019), S. 3.

⁸⁷ Vgl. Amutha, K. (2017), S. 40; Pal, H./ et. al. (2017), S. 119.

⁸⁸ Vgl. Pal, H./ et. al. (2017), S. 119 f.; Industria Jeanologica S.L. (o.J.).

⁸⁹ Vgl. Periyasamy, A./ et. al.(2017), S. 88.

⁹⁰ Vgl. Periyasamy, A. P./ Militky, J.(2017), S. 264.

⁹¹ Vgl. LG Electronics Deutschland (2016); Statista (2019a).

⁹² Vgl. Jack, T. (2013), S. 666.

⁹³ Vgl. Muthu, S. (2015a), S. 98.

größere Umweltlasten als bei langjährigem Gebrauch.⁹⁴ Um die tatsächliche Nutzungsdauer zu verlängern, ist die Information der Konsumenten über eine umweltschonende Produktpflege, die eine gleichbleibende Qualität während der Lebensdauer gewährleistet, für die Nachhaltigkeit von Bedeutung.⁹⁵

End-of-Life:

Endet die Gebrauchsphase, aufgrund von Beschädigungen, verändertem Körpergewicht oder Modeerscheinungen, bleiben verschiedene Möglichkeiten der Weiterverwertung oder Entsorgung. Durch die Weitergabe an andere, durch verschenken, verkaufen oder spenden, wird die Nutzungsphase erweitert und potentielle Umweltlasten eines neuen Produkts entfallen.⁹⁶ Insgesamt werden rund 25 % der Alttextilien in Europa örtlichen Sammelstellen zugeführt. Die übrigen 75 % landen auf Deponien oder werden verbrannt und sind damit nicht weiter nutzbar.⁹⁷

Für eine umweltfreundlichere Denimindustrie ist ein zirkuläres Produktionssystem notwendig, in welchem gebrauchte Produkte als Secondhand Ware weiterverwendet oder als Ressourcenquelle verstanden werden.⁹⁸ Der Prozess des Recyclings von Produktions- und Konsumentenabfällen -sogenannter „pre-consumer“ und „post-consumer“ Abfälle- gilt als einer der erfolgsversprechendsten Ansätze zur Minimierung der CO₂-Emissionen der Textil- und Bekleidungsindustrie.⁹⁹ Heutzutage wird der Großteil der gesammelten Denim-Abfälle zu Isoliermaterial von geringerem Wert verarbeitet. Aktuell werden neue Möglichkeiten zur Wiederverwendung des Abfalls im eigenen Produktionszyklus entwickelt, um das Produkt kreislauffähig zu machen.¹⁰⁰ Ein möglicher Ansatz ist dabei die Herstellung von regenerativen Cellulosefasern aus dem Zellstoff der Baumwolle. Alternativ können die Gewebe geschreddert und in Kombination mit Frischfasern zu neuem Garn versponnen werden.¹⁰¹

⁹⁴ Vgl. Laitala, K. (2015), S. 348; McQueen, R./ et. al. (2016), S. 2.

⁹⁵ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 565; McQueen, R./ et. al. (2016), S. 1.

⁹⁶ Vgl. Laitala, K. (2015), S. 348; Periyasamy, A./et. al.(2017), S. 88; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 150.

⁹⁷ Vgl. Zamani, B. (2014), S. 1; Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 528 f.

⁹⁸ Vgl. Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 527.

⁹⁹ Vgl. Muthu, S./ et. al. (2012), S. 1069.

¹⁰⁰ Vgl. Paul, R. (2015), S. 9; Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 527.

¹⁰¹ Vgl. Paul, R. (2015), S. 9; Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 527; Pal, H./ et. al. (2017), S. 120.

2.3 Zwischenfazit

Aufgrund der enormen Größe der Denimindustrie ist deren Einfluss auf die Umwelt erheblich.¹⁰² Sowohl Endkonsumenten, als auch viele Einkäufer sind sich der negativen Umweltauswirkungen häufig nicht bewusst.¹⁰³ Die öffentliche Wahrnehmung bezieht sich insbesondere in den letzten Jahren zunehmend auf die Thematik der Nachhaltigkeit, sodass die ökologischen Folgen der Denimindustrie an Relevanz gewinnen.¹⁰⁴ Die Branche muss sich fundamental wandeln, um mit dieser Entwicklung Schritt halten zu können. Die verschiedenen, beschriebenen Innovationen können in den jeweiligen Prozessschritten einen Anteil dazu beitragen.¹⁰⁵

Da sich AA gezielt an Kunden richtet, für die Produktökologie bereits heute eine maßgebliche Rolle spielt, ist eine ökologisch optimierte Fertigung essentiell. Aufgrund der beschriebenen, massiven Umweltauswirkungen der Denimindustrie wurde folglich eine Jeans als Beispielprodukt für die Analyse ausgewählt. Um die Umweltauswirkungen einer AA Jeans zu messen und weiter zu vermindern, dient die folgende Ökobilanz u. a. der Hotspot-Analyse um Optimierungspotentiale im Produktionsprozess aufzudecken.¹⁰⁶

Um diesem Ziel gerecht zu werden und aussagekräftige belastbare Daten zu erhalten, ist die Orientierung an bestehenden Normen vorgesehen, die im nächsten Kapitel zusammen mit der methodischen Vorgehensweise beschrieben werden.

¹⁰² Vgl. Paul, R. (2015), S. 9 f.

¹⁰³ Vgl. Paul, R. (2015), S. 9 f.; Periyasamy, A. P./ Militky, J. (2017), S. 262.

¹⁰⁴ Vgl. S. 262; Paul, R. (2015), S. 8 ff.; Periyasamy, A. P./ Militky, J. (2017).

¹⁰⁵ Vgl. Paul, R. (2015), S. 3; Pal, H./ et. al. (2017), S. 111.

¹⁰⁶ Vgl. Paul, R. (2015), S. 3.

3. Methodik Lebenszyklusanalyse (LCA)

Im folgenden Kapitel werden die methodischen Grundlagen und das schrittweise Vorgehen bei der Erstellung einer Ökobilanz erläutert, um die theoretische Basis für die eigene Untersuchung zu schaffen. Die Beschreibung des Nutzen und die Nennung möglicher Anwendungsbereiche hebt die Vorteile der Methode für die Beantwortung der Fragestellung hervor. Zuvor erfolgt jedoch zunächst eine einleitende Begriffsdefinition.

Die Lebenszyklusanalyse (LCA) ist eine quantitative Methode zur Erstellung von Ökobilanzen für Produkte, Prozesse und Dienstleistungen.¹⁰⁷ Dabei werden alle Input- und Outputflüsse herangezogen, die innerhalb der definierten Produktsystemgrenzen stattfinden. Durch die objektive Analyse der ökologischen Auswirkungen werden Verbesserungspotentiale ermittelt.¹⁰⁸ Der umfassende Rahmen einer LCA gewährleistet, dass Produktsysteme ganzheitlich beurteilt und Lastverschiebungen bei Variationen innerhalb eines Produktsystems berücksichtigt werden.¹⁰⁹

3.1 Nutzen einer LCA

Die Funktion einer LCA¹¹⁰ im unternehmerischen Kontext besteht in erster Linie in der Bereitstellung von Informationen über Umweltauswirkungen bestimmter Produkte, Prozesse oder Dienstleistungen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend in verschiedenen Unternehmensbereichen weiterverwendet. In Anbetracht des steigenden Umweltbewusstseins vieler Konsumenten können aus der detaillierten Analyse von ökologischen Produktaspekten entscheidende Vorteile generiert werden¹¹¹:

Einerseits dienen die Ergebnisse einer LCA der Entwicklung von Entscheidungshilfen für die Produktentwicklung und das strategische Management sowie zur Evaluierung von Verbesserungspotentialen im Produktionsprozess. Dabei können beispielsweise ökologische Hotspots einer Lieferkette identifiziert und Produkt- oder Prozessvarianten miteinander verglichen werden.¹¹² Anhand der gewonnenen Erkenntnisse können Pro-

¹⁰⁷ Vgl. DIN EN ISO 14040: 2009-11, S. 4; Roos, S./ et. al. (2015), S. 232; DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 7.

¹⁰⁸ Vgl. Textile Exchange (2014), S. 12; Muthu, S. (2015), S. 275; DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 10.

¹⁰⁹ Vgl. Roos, S./ et. al. (2015a), S. 232.

¹¹⁰ Da die vorliegende LCA über ein Produkt eines Bekleidungsunternehmens erstellt wird, liegt der Fokus des folgenden Abschnitts auf der Nutzung von LCA's in Firmen im Bereich Bekleidung.

¹¹¹ Vgl. DIN EN ISO 14040: 2009-11, S. 4; Muthu, S. (2015b), S. 275; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 125; Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 83; DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 7.

¹¹² Vgl. DIN EN ISO 14040: 2009-11, S. 4; Muthu, S. (2015b), S. 275; DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 7.

dukte bereits ab der Designphase umweltfreundlicher konzipiert werden.¹¹³ Zusätzlich können Unternehmen Kostenvorteile durch Effizienzsteigerungen erwirtschaften.¹¹⁴ Da die industrielle Herstellung von Bekleidung mit einem erheblichen Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen und der Entstehung weiterer Umweltauswirkungen einhergeht, sind die beschriebenen Vorteile für die Industrie von besonderer Relevanz.¹¹⁵ Andererseits werden die gewonnenen Informationen zu Marketingzwecken genutzt. Die LCA liefert hierbei zuverlässige Daten zur Kommunikation von Umweltaspekten.¹¹⁶ Vergleiche mit Ergebnissen anderer LCAs sind hierbei lediglich sinnvoll, wenn die zugrundeliegenden Annahmen der entsprechenden Studien übereinstimmen.¹¹⁷ Durch die gezielte Kommunikation der Studienergebnisse kann die Transparenz der Beschaffungswege gegenüber dem Konsumenten gefördert und damit das Vertrauen der Kunden gegenüber dem Unternehmen gesteigert werden. Für die Bekleidungsindustrie gilt dieser Punkt in besonderem Maße, da die Beschaffungsketten durch viele Subunternehmer häufig weit verzweigt, dementsprechend schwer nachvollziehbar und intransparent sind.¹¹⁸ Durch viele ökologische und humanitäre Skandale ist das Vertrauen der Konsumenten in die Branche belastet.¹¹⁹ Eine LCA kann an dieser Stelle als wissenschaftliche Methode objektive Informationen liefern, um den Konsumenten bei einer reflektierten Kaufentscheidung zu unterstützen.¹²⁰ In den vergangenen Jahren sind bereits einige Textil- und Bekleidungsunternehmen dazu übergegangen LCAs für einzelne Produkte oder Produktionsteilbereiche zu erstellen; darunter vereinzelt auch Unternehmen aus dem Denim Bereich (ISKO, Orta Anadolu, Levi Strauss & Co., Nudie Jeans).¹²¹

3.2 LCA Verfahren

Das standardisierte Vorgehen zur Erstellung einer LCA, gemäß DIN EN ISO 14040 und 14044, besteht, wie in Abb. 1 dargestellt, aus den folgenden vier voneinander abhängigen Schritten:¹²²

¹¹³ Vgl. Muthu, S. (2015b), S. 275; Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 91 f.

¹¹⁴ Vgl. Schrott, W./ Paul, R.(2015), S. 563.

¹¹⁵ Vgl. Rana, S. (2015), S. 199.

¹¹⁶ Vgl. DIN EN ISO 14040: 2009-11, S. 4; Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 91 f.; DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 7.

¹¹⁷ Vgl. Muthu, S. (2015b), S. 275; DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 8.

¹¹⁸ Vgl. Piegsa, E. (2010), S. 3.

¹¹⁹ Vgl. Franken, N. (2018), S. 133.

¹²⁰ Vgl. Schrott, W./ Paul, R.(2015), S. 564.

¹²¹ Vgl. van der Velden, N. M./ et.al (2014), S. 333; Levi Strauss & Co. (2015); Hedman, E. (2018); Sanko Tekstil Isletmeleri San. ve Tic. A.Ş. (2018); Orta Anadolu Tic. ve San. İşl. A.Ş. (2018). Siehe hierzu auch Kapitel 4 *Stand der Forschung*.

¹²² Vgl. DIN EN ISO 14040: 2009-11, S. 16; Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 83.

1. Im ersten Schritt „Goal & Scope“ werden die Ziele und Rahmenbedingungen der Studie erläutert.¹²³ Dazu gehört die Beschreibung des Produktsystems, der Systemgrenzen, der funktionellen Einheit, des Referenzflusses, der verwendeten Allokationsverfahren, der Anforderungen an Daten,

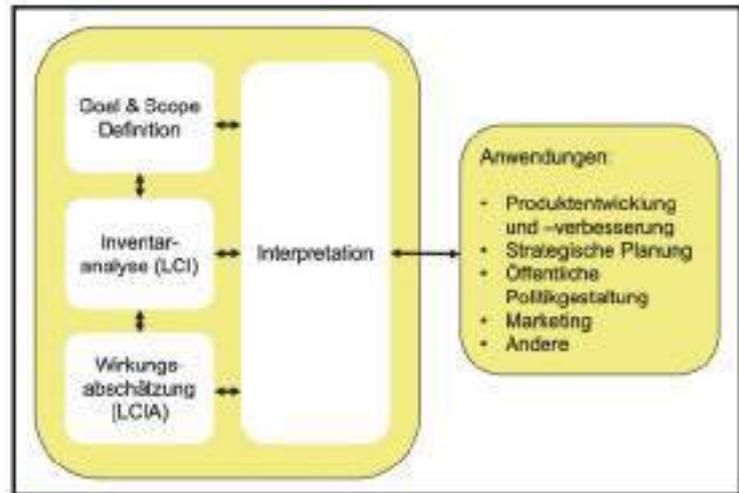


Abb. 1: Phasen einer Ökobilanz, Quelle: eigene Darstellung, in Anlehnung an DIN EN ISO 14040 (2009), S. 16.

der getroffenen Annahmen und Einschränkungen, sowie der Methoden zur Wirkungsabschätzung, Auswertung und kritischen Prüfung.¹²⁴ Die funktionelle Einheit quantifiziert die Leistung, welche das zu analysierende Produktsystem erbringt und dient als Bezugsgröße für die Skalierung der Input- und Outputdaten. Der Referenzfluss bezieht sich auf die Menge des Produktes, die zur Erbringung der Leistung (funktionelle Einheit) benötigt wird. Die Systemgrenze definiert die relevanten Prozesse im Produktlebenszyklus, die durch die Ökobilanz, entsprechend der Zielsetzung, analysiert werden sollen. Die hierfür herangezogenen Kriterien müssen erläutert und Entscheidungen begründet werden.¹²⁵ Durch die Abschneidekriterien wird anhand der Gesamtmasse, der Gesamtenergie oder der gesamten Umweltauswirkung festgelegt, welchen Anteil am Endprodukt die berücksichtigten kumulierten Inputs ausmachen müssen, um das Produktsystem adäquat abzubilden.¹²⁶

2. Während des zweiten Schritts, der *Inventaranalyse* („Life Cycle Inventory“ (LCI)), wird eine Sachbilanz erstellt, welche alle zuvor in der Systemgrenze eingeschlossenen Prozesse anhand ihrer Inputs und Outputs abbildet. Die dazu benötigten Daten werden am Produktionsstandort gemessen, errechnet oder geschätzt bzw. alternativ aus generischen Quellen entnommen. Dabei sollte der zeitliche und geographische Rahmen sowie die technischen Rahmenbedingungen der erhobenen Datensätze möglichst präzise gewählt werden.¹²⁷ Weitere Gütekrite-

¹²³ Vgl. Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 83; DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 7 f.

¹²⁴ Vgl. DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 16.

¹²⁵ Vgl. DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 17.

¹²⁶ Vgl. DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 18.

¹²⁷ Vgl. DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 19.

rien wie die Vollständigkeit, Repräsentativität, Konsistenz, Vergleichspräzision, die Unsicherheit der Information und die Qualität der Datenquellen, werden in der abschließenden kritischen Prüfung evaluiert.¹²⁸ Sowohl die Herkunft als auch die Qualität der Daten werden hierbei dokumentiert.¹²⁹ Die rechnerische Allokation von mehrfunktionalen Prozessen sollten möglichst durch Teilung der einzelnen Module eines Prozesses oder durch das Einbeziehen entsprechender Nebenprozesse vermieden werden. Falls dies nicht möglich ist, sollte die Aufteilung der Outputs gemäß der physikalischen Verhältnisse erfolgen. Ist diese Erfassung ebenfalls nicht praktikabel, werden andere Kenngrößen, die das Verhältnis der beiden Koppelprodukte widerspiegeln, wie beispielsweise monetäre Wertschöpfung, genutzt.¹³⁰

3. Anschließend werden im Rahmen der *Wirkungsabschätzung* („Life Cycle Impact Assessment“ (LCIA)) die verschiedenen Umweltwirkungen anhand der Daten aus der LCI berechnet. Die dazu herangezogenen Wirkungskategorien, -indikatoren und Charakterisierungsmodelle wurden zuvor im Hinblick auf die Zielsetzung der Studie ausgewählt und erläutert. Die Ergebnisse der Sachbilanz werden daraufhin den ausgewählten Wirkungskategorien zugeordnet und die Wirkungsindikatoren mit Hilfe der Charakterisierungsfaktoren berechnet.¹³¹ In der Regel werden hierzu bestehende Wirkungsmodelle verwendet.¹³²
4. In der abschließenden *Interpretation* werden die Ergebnisse ausgewertet und die Zusammenhänge analysiert.¹³³ Die anhand von Schritt 2 und 3 als signifikant analysierten Prozesse werden beschrieben.¹³⁴ Die vorliegenden Resultate werden auf Basis der oben genannten Kriterien einer kritischen Prüfung unterzogen. Daraufhin werden die vorangegangenen Schritte bei Bedarf noch einmal überarbeitet. Abschließend wird ein Fazit gezogen, Limitationen aufgezeigt und mögliche Handlungsempfehlungen gegeben.¹³⁵ Die Auswertungsphase nimmt dabei Bezug auf die gesetzten Ziele und Rahmenbedingungen aus der Goal & Scope Phase und rundet die LCA ab.¹³⁶

Die Leitlinien DIN EN ISO 14040 und 14044 schaffen verbindliche Rahmenbedingungen für die Erstellung von Ökobilanzen, sind jedoch ausdrücklich nicht für Zerti-

¹²⁸ Vgl. DIN EN ISO 14044:2018-05 , S. 20.

¹²⁹ Vgl. DIN EN ISO 14044:2018-05 , S. 21.

¹³⁰ Vgl. DIN EN ISO 14044:2018-05 , S. 25.

¹³¹ Vgl. DIN EN ISO 14044:2018-05 , S. 27.

¹³² Vgl. DIN EN ISO 14044:2018-05 , S. 28.

¹³³ Vgl. Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 83; DIN EN ISO 14044:2018-05 , S. 7 f.

¹³⁴ Vgl. Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 91.

¹³⁵ Vgl. Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 91; DIN EN ISO 14044:2018-05 , S. 7 f.

¹³⁶ Vgl. DIN EN ISO 14044:2018-05 , S. 36.

fizierungszwecke geeignet.¹³⁷ Demnach ist die Norm eher als Handlungsleitfaden zu verstehen. Um diesen zu spezifizieren, können verschiedene produktbezogene Modellierungsvorschriften, wie die Product Category Rules (PCR) der Environmental Product Declaration (EPD)¹³⁸ oder die Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) der europäischen Union (EU) herangezogen werden.¹³⁹

3.3 Bezugsrahmen der vorliegenden Analyse

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird, neben den vorgestellten ISO-Normen, die PCR „Trousers, Shorts and Slacks and similar Garments“ zur konzeptionellen Orientierung verwendet.¹⁴⁰ Eine PEFCR für den Bereich Jeans befindet sich zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit in der Entwicklungsphase und ist somit noch nicht öffentlich zugänglich.¹⁴¹ Da die Richtlinie der EU aber eine größere Detailtiefe bietet, wird die PEFCR eines T-Shirts in den übertragbaren Bereichen berücksichtigt.

Die bereits verfügbare PCR bezieht sich auf Hosen, Shorts, Freizeithosen und ähnliche Bekleidung, die den unteren Bauch und beide Beine jeweils vollständig oder teilweise bedecken. Jeans werden dabei explizit als Anwendungsbereich aufgeführt. Die PCR definiert keine funktionelle Einheit, da die Verwendungen und damit Funktionen der eingeschlossenen Produkte stark variieren. In der Analyse sollten alle Prozesse im Rahmen von „Cradle-to-Gate“ eingeschlossen werden, wobei die Nutzungsphase und die Entsorgung auf freiwilliger Basis hinzugezogen werden können. Als Abschneidekriterium sollten 99 % der Umweltauswirkungen innerhalb der Systemgrenzen genutzt werden.¹⁴²

Für die Datenerfassung werden zwei verschiedene Arten von Informationen verwendet:

1. Daten mit Bezug auf die Umweltaspekte des betrachteten Systems, wie Materialien oder Energieflüsse, die in das Produktionssystem gelangen. Diese Daten stammen normalerweise von dem Unternehmen, das die Ökobilanzierung durchführt. Diese Daten sollten so spezifisch und repräsentativ wie möglich erfasst werden.

2. Daten in Bezug auf die Auswirkungen des Lebenszyklus der Material- oder Energieflüsse, die in das Produktionssystem gelangen. Diese Daten stammen normalerweise aus Datenbanken.¹⁴³ Dabei wird zwischen spezifischen, primären Daten und generischen, sekundären Daten unterschieden. Sekundäre Daten werden in aus-

¹³⁷ Vgl. DIN EN ISO 14040: 2009-11, S. 6.

¹³⁸ EPD = System für produktbezogene Umwelterklärungen basierend auf DIN EN ISO 14025 und DIN EN ISO 15804 (EPD International AB (2015), S. 4).

¹³⁹ Vgl. Dahllöf, L. (2004), S. 1; Pesnel, S./ Payet, J. (2019); EPD International AB (2019).

¹⁴⁰ Vgl. EPD International AB (2019).

¹⁴¹ Vgl. Europäische Kommission (2019).

¹⁴² Vgl. EPD International AB (2019), S. 4-12.

¹⁴³ Vgl. EPD International AB (2019), S. 13.

gewählte generische Daten, die den Gütekriterien Präzision und Vollständigkeit entsprechen und Stellvertreter-Daten, die diese Kriterien nicht erfüllen, unterteilt. Primäre Daten sind sekundären Daten vorzuziehen; ausgewählte generische Daten sind Stellvertreter-Daten vorzuziehen.

Statt der Unterscheidung zwischen Vordergrund- und Hintergrundsystemen, wird in der PCR, zur Strukturierung des Lebenszyklus, zwischen Upstream-Prozessen (Cradle-to-Gate), Kernprozessen (Gate-to-Gate) und Downstream-Prozessen (Gate-to-Grave) differenziert. Dabei entsprechen die Kernprozesse dem Vordergrundsystem und die Up- sowie Downstream-Prozesse dem Hintergrundsystem.¹⁴⁴

Die Upstream-Prozesse inkludieren jene vorgelagerten Prozesse der Vorkette, die dem Kernprozess zugeführt werden.¹⁴⁵ Diese umfassen den Anbau bzw. die Synthese, die Vorbereitung und Produktion von Fasern, die Produktion von Zutaten, Halbfertigprodukten, Farb- und Hilfsstoffen, die im Upstream und Kernprozess benötigt werden und jene Wirkungen, die durch die Produktion von Elektrizität und Kraftstoffen während dem Upstream-Prozess entstehen sowie die Produktion von primärer und sekundärer Verpackung. Explizit ausgeschlossen sind dabei der Transport der Rohmaterialien, die Bereitstellung von Investitionsgütern und Gebäuden, Abfälle aus deren Abriss, sowie Personalaktivitäten (z. B. Arbeitswege).¹⁴⁶ Daten über Upstream-Prozesse, die im direkten Einflussbereich des Unternehmens liegen, sollten vor Ort erfasst werden. Daten über Hauptbestandteile, -zutaten und Verpackung, die von direkten Lieferanten stammen, sollten als primäre Daten angefragt werden. Die genutzte Elektrizität in Upstream-Prozessen sollte möglichst dem generierten oder gelieferten Strom des Stromlieferanten entsprechen. Falls Informationen hierüber nicht bekannt sind, sollte der „National residual electricity mix“ mit Herkunftsnachweis herangezogen werden. Ist dieser ebenfalls nicht verfügbar, wird der „National electricity production mix“ verwendet. Wenn die Produktion von Verpackungen im direkten Einflussbereich des Unternehmens liegt, sollten primäre Daten genutzt werden.¹⁴⁷

Als Kernprozesse werden jene Abschnitte des Produktlebenszyklus bezeichnet, die im Einflussbereich des Auftraggebers liegen.¹⁴⁸ Bei einer Jeans umfasst der Kern die Vorbereitung des Materials (z. B. spinnen, stricken, verstrecken, schlichten, veredeln), die Produktion des finalen Produkts inklusive Qualitätskontrolle sowie die Verpackung des Bekleidungssteils und den dabei entstehenden Abfall. Wirkungen, die durch die Produktion von im Kernprozess genutzter Elektrizität und Kraftstoffen entstehen, externer Transport zu den Kernprozessen, interner Transport des Gewebes und Wartung der

¹⁴⁴ Vgl. Tillman, A. (2000), S. 118; Elghali, L./ et. al. (2007), S. 6079; EPD International AB (2015), S. 20; EPD International AB (2019), S. 9.

¹⁴⁵ Vgl. DIN EN 15804:2014-07, S. 27.

¹⁴⁶ Vgl. EPD International AB (2019), S. 10.

¹⁴⁷ Vgl. EPD International AB (2019), S. 18.

¹⁴⁸ Vgl. EPD International AB (2019), S. 20.

Maschinen zählen ebenfalls zu den Kernprozessen. Insgesamt sollten mindestens 99 % des Gewichts der deklarierten Einheit inklusive Verpackung in der Analyse berücksichtigt werden. Nicht inkludiert werden die Herstellung der Produktionsmaschinen, der Gebäude und anderer Investitionsgüter, An- und Abreise des Personals, Geschäftsreisen sowie Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.¹⁴⁹ Für die Montage des Produkts, die Produktion der Hauptkomponenten, die Behandlung von Produktionsabfällen und die on-site Generation von Dampf, Hitze und Elektrizität sollten Daten primär erfasst werden. Der Transport von Hauptteilen und Komponenten entlang der Lieferkette sollte entsprechend dem tatsächlichen Transportmittel, der zurückgelegten Distanz und der Beladung kalkuliert werden. Die Datenauswahl im Bereich Elektrizität unterliegt der gleichen Regelung wie in den Upstream-Prozessen.¹⁵⁰

Der Transport von der Produktion zu einem durchschnittlichen Verkaufspunkt sollte, als nachgelagerter Downstream-Prozess, mit eingeschlossen werden. Alle anderen Downstream-Aktivitäten, wie die Gebrauchsphase inklusive der Nutzungshäufigkeit, dem Verkauf online oder stationär, der Anreise von Endkunden zum Store, dem Gebrauch der Konsumenten (u. a. waschen, trocknen, bügeln) oder die Entsorgungsphase mit der Handhabung von Verpackungsmüll und der Produktentsorgung können auf freiwilliger Basis mit berücksichtigt werden.¹⁵¹ Der Transport des Endprodukts zum Konsumenten sollte, bezüglich Distanz und Transportmittel möglichst die tatsächliche Situation abbilden. Die Daten bezüglich der Gebrauchsphase beruhen i. d. R. auf Szenarien, welche anhand verifizierter Studien in Verbindung mit durchschnittlicher oder empfohlener Produktnutzung, entwickelt werden. Annahmen über die Entsorgungsphase sollten technisch, sowie ökonomisch praktikabel sein und den aktuellen Regulierungen entsprechen. Alle getroffenen Annahmen müssen entsprechend dokumentiert werden. Die genutzte Elektrizität sollte möglichst dem „National residual electricity mix“ entsprechen.¹⁵²

Als erforderliche Wirkungskategorien schreibt die PCR den Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt (Global Warming Potential; GWP), Eutrophierungspotential (EP), Versauerungspotential (Acidification Potential; AP), Potential zur Bildung photochemischer Oxidationsmittel (Photochemical Oxidant Formation Potential; POFP) und Potential zur Wasserverknappung (Water Scarcity Footprint; WSF) vor. Weitere Größen können auf freiwilliger Basis hinzugefügt werden.¹⁵³

Die Umsetzung der beschriebenen Kriterien in der vorliegenden Arbeit ist anhand von Kapitel 5.1 *Goal & Scope* und Anhang 1 nachzuvollziehen.

¹⁴⁹ Vgl. EPD International AB (2019), S. 10.

¹⁵⁰ Vgl. EPD International AB (2019), S. 19. Siehe S. 19 der vorliegenden Arbeit.

¹⁵¹ Vgl. EPD International AB (2019), S. 10 f.

¹⁵² Vgl. EPD International AB (2019), S. 19.

¹⁵³ Vgl. EPD International AB (2019), S. 15 f.

4. Stand der Forschung

Die Erstellung von Ökobilanzen wird mittlerweile in vielen Untersuchungen über die Umweltauswirkungen der Textil- und Bekleidungsindustrie als Methode herangezogen.¹⁵⁴ LCAs werden auf allen Stufen der textilen Produktionskette von verschiedenen Akteuren, wie Faser- und Stoffproduzenten, Modemarken, Brancheninitiativen, politischen Institutionen und Bildungseinrichtungen, durchgeführt.¹⁵⁵

Zur detaillierten Untersuchung der Verbreitung von Ökobilanzen mit Bezug zur Jeans- und Denimindustrie wurden Artikel in Fachbüchern und -zeitschriften sowie Informationen verschiedener brancheninterner Unternehmen herangezogen. Parallel dient die folgende Literaturlanalyse der Ermittlung von Referenzgrößen und Benchmarks, um die Ergebnisse der eigenen LCA in eine komparative Relation zur Branchenkenzahl setzen zu können.¹⁵⁶

Analyse Level	Quelle	Jahr	Eigene Analyse?	Pri-märdaten?	Stichwort
Bekleidungsindustrie	Peters G / et al	2015	Nein	Nein	Wie erstellt man einen Carbon footprint in der Textilindustrie? Welche Studien gibt es bereits?
	Quantis	2018	Ja	Nein	Umweltauswirkungen der gesamten Textil-, Bekleidungs- und Schuhindustrie
	Steinberger J / et al	2009	Ja	Nein	LC -Shirt und Polyesterjacke Fokus auf lokalen Einflüssen
	Nielsen A M / Nielsen P H	2009	Ja	Ja	Vergleichende LCA für zwei verschiedene Herstellungsprozesse eines -Shirts
	van der Velden N / et al	2013	Ja	Nein	Benchmark LCA für Textilien aus Baumwolle, Polyester, Nylon, Acryl und Elastan basierend auf Literaturangaben und LCA Datenbanken
	Dahlhöf L	2004	Nein	Nein	Anwendbarkeit und Limitationen von LCA im Textilsektor
	Muthu S	2015	Nein	Nein	Vergleichende Analyse von LCA von Textilien aus Naturfasern und Kunstfasern, Zusammenstellung vorhandener Studien
	Rana S / et al	2015	Nein	Nein	Textilien und Bekleidung aus Baumwolle, Vergleich vorhandener LCAs im Baumwollbereich auf verschiedenen Analyseebenen
Denimindustrie	Karthik T / Murugan R	2017	Nein	Nein	Carbon footprint Denimindustrie, Welche Prozesse finden statt? Dann Bezug auf Levis, Mud und Clothing Industry Rating Authority (Hongkong)
	Pal H / et al	2017	Nein	Nein	Wasser- Fußabdruck der Denimindustrie, mit Bezug auf Levis, Jack & Jones
	Schrott W / Paul R	2015	Nein	Nein	Produktion einer Jeans unter ökologischen Gesichtspunkten, aus einem LCA Verständnis heraus und mit Bezug auf Levis
Jeans Produkt	Levi Strauss & Co	2009/2015	Ja	Ja	LCA Levis Jeans 501
	Hackett T	2015	Nein	Nein	Vergleichende LCA einer Denim Jeans und eines Baumwoll -Shirts, Daten Levis 501 Jeans
	Periyasamy A / et al	2017	Nein	Nein	LCA über Denim, Beschreibung Produktlebenszyklus, Ergebnisse Levis
	Hedman E	2018	Ja	Ja	Vergleichende LCA über 3 Jeansmodelle von Nudie Jeans
	Roos S / et al	2015	Ja	Nein	Schwedischer Bekleidungskonsum, ein Beispielprodukt ist eine Jeans
	MUD Jeans International B V	2015	Ja	Ja	Carbon footprint Study MUD Jeans
Gewebe	Orta Anadolu Tic ve San şli A Ş	2018	Ja	Ja	LCA 1qm, vier verschiedene Denimstoffe, plus Stoff 9055 der MA RAA
	Sanko Tekstil İletmeleri San ve Tic A Ş	2018	Ja	Ja	LCA 1qm Standard Denim
Faser	Textile Exchange	2014	Ja	Ja	LCA Biobaumwolle, globaler Durchschnitt
	C&A Foundation	2018	Ja	Ja	Vergleichende Analyse von konventioneller Baumwolle, Baumwolle der Better Cotton Initiative und Biobaumwolle

Abb. 2: Literaturübersicht Ökobilanzen zum Thema Jeans, Quelle: eigene Darstellung.

¹⁵⁴ Vgl. Yacout, D./ et. al. (2016), S. 327.

¹⁵⁵ Vgl. Van der Velden, N. (2014), S. 333.

¹⁵⁶ Diese Vergleiche dienen explizit nicht der Veröffentlichung, sondern ausschließlich zur internen Abschätzung, da die sachgerechte Vergleichbarkeit aufgrund verschiedener Annahmen der unterschiedlichen Analysen nicht vollständig gegeben ist.

Außerdem wird das jeweilige methodische Vorgehen betrachtet, um Orientierungshilfen abzuleiten, welche eine bessere Vergleichbarkeit der eigenen Analyse gewährleisten sollen. Die vorliegenden Studien, die sich anhand der LCA-Systematik mit Abschnitten oder der gesamten Jeans- und Denimindustrie beschäftigen, lassen sich in verschiedene Betrachtungsebenen einteilen. Zur Übersichtlichkeit sind die analysierten Autoren den Betrachtungsfeldern zugeordnet und mit inhaltlichen Stichpunkten versehen. Zudem wurde die Verwendung von Primärdaten gekennzeichnet und markiert, ob eine eigene Lebenszyklusanalyse durchgeführt wurde (siehe Abb. 2). Im folgenden Abschnitt werden die Studien entsprechend ihres Bezugsrahmens in unterschiedlicher Intensität beleuchtet.

4.1 Bekleidungsindustrie

Einige der in Abb. 2 genannten Autoren¹⁵⁷ beziehen sich zwar auf die Bekleidungsindustrie, sind darüber hinaus für die folgende Analyse aber aufgrund des breiter gefassten Rahmens oder anderer Produktschwerpunkte nicht relevant.

4.2 Denimindustrie

Die Autoren *Karthik, T./ Murugan, R., Pal, H./ et. al.* und *Schrott, W./ Paul, R.* beschreiben die Denimindustrie in ihrer Gesamtheit und verweisen auf vorliegende Studien von Unternehmen. Dabei wird die LCA des amerikanischen Unternehmens Levi Strauss & Co. bei sämtlichen Artikeln erwähnt.

4.3 Jeans Produkt

Auch auf der Betrachtungsebene des Produkts beziehen sich zwei Autoren ausschließlich auf die Studie von *Levi Strauss & Co.*, ohne eine eigene Bilanzierung durchzuführen.¹⁵⁸ *Hedman, E.* und *MUD Jeans International B.V.* nutzen die Ergebnisse von *Levi Strauss & Co.* ebenfalls als Industriemaßstab zu Vergleichszwecken.¹⁵⁹ Aus dieser häufigen Nennung lässt sich eine besondere Relevanz der *Levis*-Studie für die Branche ableiten. Diese wird daher im Folgenden als Industriestandard interpretiert. Ein Vergleich mit den Ergebnisse von *Hedman, E.* und *MUD Jeans International B.V.* erscheint ebenfalls interessant, da es sich bei *Nudie* und *MUD* um spezifisch nachhaltige Jeansmarken handelt, die von ihrer Nachhaltigkeitsstrategie mit *AA* zu vergleichen sind. Da die Studie von *Roos, S./ et. al.* auf theoretischen Werten der besten verfügbaren Technologie (BVT) und nicht auf primären, erhobenen Daten

¹⁵⁷ In Abb. 2 weiß hinterlegt.

¹⁵⁸ Die Autoren *Hackett, T.* und *Periyasamy, A./ et. al.*

¹⁵⁹ Vgl. *MUD Jeans International B.V.* (2015), S. 3; *Hedman, E.* (2018), S. 61.

beruht, wird diese nicht als Vergleichswert einbezogen.¹⁶⁰ In der Zielsetzung besteht eine gewisse Variation zwischen den Studien. Während *Levi Strauss & Co.* in erster Linie die Hotspots der eigenen Produktionskette zum Zwecke der künftigen Produktoptimierung herausarbeitet, vergleicht *Hedman, E.* die Umweltwirkungen drei verschiedener Modelle. Die Studie von *Roos, S./ et. al.* untersucht hingegen den gesamten schwedischen Bekleidungskonsum.¹⁶¹

Als Systemgrenzen wählen 80 % der analysierten Quellen den Cradle-to-Grave Ansatz, welcher alle Produktionsschritte vom Rohstoff bis zum Endprodukt, sowie die Gebrauchsphase und die Entsorgung umfasst.¹⁶²

Hedman, E. legt in der Analyse einer Jeans der Marke Nudie keine allgemein gültigen Abschneidekriterien eines bestimmten Prozentsatzes fest, um keine potentiell relevanten Prozessschritte zu vernachlässigen. Stattdessen werden getroffene Annahmen und Limitationen erläutert. *Roos, S./ et. al.* schließt die Produktion von Anlagen und Betriebsmitteln mit ein.¹⁶³ Bei *Levi Strauss & Co.* und *MUD Jeans International B.V.* sind keine Informationen über Abschneidekriterien bekannt.

Wirkungskategorien	Levi Strauss & Co. (2009)	Levi Strauss & Co. (2015)	Hedman, E. (2018)	Roos, S./ et. al. (2015)	MUD Jeans (2015)	Summe
Climate Change	x	x	x	x	x	5
Energy use	x					1
Eutrophication	x	x	x	x		4
Acidification	x		x	x		3
Smog (Photo-chemical oxidant potential)	x					1
Human toxicity	x			x		2
Eco toxicity	x			x		2
Water intake	x					1
Water consumption		x	x			2
Land occupation		x	x			2
Abiotic Depletion		x	x			2
Photochemical ozone formation			x	x		2
Ozone depletion			x			1

Abb. 3: Übersicht Wirkungskategorien Jeans-Ökobilanzen, Quelle: eigene Darstellung.

Die untersuchten Studien analysieren die Umweltauswirkungen der Jeans anhand der in Abb. 3 dargestellten Wirkungsgrößen. Der Beitrag der Produkte zum anthropogenen Treibhauseffekt, gemessen in kg CO₂-Äquivalent, wird bei allen Untersuchungen herangezogen. Ähnlich relevant erscheint das Eutrophierungspotential. Die Variation der anderen Wirkungsgrößen kann u. a. auf eine mangelnde produktspezifische Stan-

¹⁶⁰ Vgl. Roos, S./ et. al. (2015), S. 13.

¹⁶¹ Vgl. Levi Strauss & Co. (2009), S. 2; Roos, S./ et. al. (2015), S. 11; Hedman, E. (2018), S. 3.

¹⁶² Vgl. Levi Strauss & Co. (2009), S. 6; Levi Strauss & Co. (2015), Roos, S./ et. al. (2015), S. 16; S. 5; Hedman, E. (2018), S. 16.

¹⁶³ Vgl. Roos, S./ et. al. (2015), S. 16; Hedman, E. (2018), S. 23.

dardisierung zum Zeitpunkt der Erstellung der Studien zurückgeführt werden.¹⁶⁴ Sowohl *Levi Strauss & Co.*, *Roos, S./ et. al.*, als auch *Hedman, E.* orientieren sich in ihrer Analyse an den Richtlinien zur Ökobilanzierung ISO 14040 und bzw. oder 14044.¹⁶⁵ *MUD Jeans International B.V.* nutzen den GHG-Protocol Standard, der sich ausschließlich auf die Analyse von Treibhausgasemissionen beschränkt.¹⁶⁶

Levi Strauss & Co. verwendet die Ökobilanzierungssoftware GaBi von Thinkstep.¹⁶⁷ *Roos, S./ et. al.* nutzt für die Analyse der Jeans ebenfalls GaBi, führt jedoch zusätzlich Vergleiche zu der Software SimaPro durch, um softwarebedingte Fehler auszugleichen.¹⁶⁸ *Hedman, E.* modelliert ausschließlich mit SimaPro.¹⁶⁹ Beide Programme gehören zu den führenden Softwarelösungen zur Ökobilanzierung.¹⁷⁰ Beim Vergleich der vorliegenden Arbeit mit *Hedman, E.* müssen demnach softwarebedingte Abweichungen berücksichtigt werden.

Unter Betrachtung der Ergebnisse jener Quellen, die eine Jeans bilanzieren, wird die Herausforderung vergleichender Aussagen deutlich. Bei *Roos, S./ et. al.* liegen die ökologischen Schwachpunkte bei dem Ausstoß von klimawirksamen Emissionen in der Faserproduktion, im Spinnprozess, im Webprozess und in der Konfektion.¹⁷¹

Unternehmen	Jahr	Funktionelle Einheit	Climate Change (kg CO ₂ -eq.)
Levi Strauss & Co.	2009/2015	Levis 501 Jeans, gesamter Lebenszyklus, 2 Jahre = 104 Wäschen	33,4
Roos, S./ et. al.	2015	Garment Service Life, 1 Jahr, 200 Nutzungszyklen = 22 Wäschen	10,5
Mud Jeans	2015	Eine durchschnittliche MUD Jeans, ohne Berücksichtigung der Gebrauchsphase	8,878
Hedman, E.A.	2018	Ein Paar Jeans A einer durchschnittlichen Größe, produziert von Nudie Jeans und in Schweden konsumiert, über die gesamte Nutzungsdauer von 200 Nutzungszyklen	16,65
		Ein Paar Jeans B einer durchschnittlichen Größe, produziert von Nudie Jeans und in Schweden konsumiert, über die gesamte Nutzungsdauer von 200 Nutzungszyklen	12,49
		Ein Paar Jeans C einer durchschnittlichen Größe, produziert von Nudie Jeans und in Schweden konsumiert, über die gesamte Nutzungsdauer von 200 Nutzungszyklen	11,97

Abb. 4: Gegenüberstellung der Jeans-Ökobilanzen anhand der funktionellen Einheit mit Anzahl Wäschen und dem GWP-Ergebnis, Quelle: eigene Darstellung.

Bei der Untersuchung von *Levi Strauss & Co.* sind die Treibhausgasemissionen zu 58 % auf die Gebrauchsphase zurückzuführen.¹⁷² In der Auswertung von *Hedman, E.*

¹⁶⁴ Die PCR, die in der vorliegenden Arbeit herangezogen wird, wurde erst 2019, nach Erscheinung der beschriebenen Analysen, veröffentlicht.

¹⁶⁵ Vgl. Roos, S./ et. al. (2015), S. 12; Levi Strauss & Co. (2015), S. 5; Hedman, E. (2018), S. 10.

¹⁶⁶ Vgl. Palebluedot LLC. (o.J.).

¹⁶⁷ Vgl. Levi Strauss & Co. (2009), S. 6.

¹⁶⁸ Vgl. Roos, S./et. al. (2015), S. 12.

¹⁶⁹ Vgl. Hedman, E. (2018), S. 15.

¹⁷⁰ Vgl. Lüdemann, L./ Feig, K. (2014), S. 15.

¹⁷¹ Vgl. Roos, S./ et. al. (2015), S. 46.

¹⁷² Vgl. Levi Strauss & Co. (2009), S. 9.

machen die Treibhausgasemissionen der Gebrauchsphase je nach Jeansmodell rund 25-30 % aus.¹⁷³

Beim Wasserverbrauch zeigt sich ein ähnlich inkonsistentes Bild: Während laut den Ergebnissen von *Roos, S./ et. al.* und *Hedman, E.* der Wasserverbrauch bzw. die Wasserverknappung fast ausschließlich im Rahmen der Faserproduktion entsteht, ist der Wasserbedarf gemäß der Analyse von *Levi Strauss & Co.* zu gleichen Teilen auf die Gebrauchsphase und die Fasergewinnung zurückzuführen.¹⁷⁴ Diese Diskrepanz ist primär aus den unterschiedlichen Annahmen in Bezug auf die Lebensdauer und die damit verbundenen Gebrauchsgewohnheiten herzuleiten (siehe Abb. 4). Die aufgeführten Unterschiede schränken die Vergleichbarkeit der Studienergebnisse in ihrer aktuellen Form stark ein. Diese Umstände sind bei jeder vergleichenden Aussage der vorliegenden Arbeit zu berücksichtigen. Zudem muss bei der eigenen Modellierung der Gebrauchsphase beachtet werden, dass eine längere Nutzungsdauer zwar die relative Bedeutung dieser im Vergleich zu anderen Produktionsphasen erhöht, gleichzeitig jedoch die Gesamtauswirkungen je Nutzung verringert.¹⁷⁵

4.4 Gewebe

Zwei Denim-Produzenten, die für AA die entsprechenden Gewebe herstellen, fertigen bereits zu ihren Produkten EPDs an. Daraus lassen sich die Umweltwirkungen je m² Denim Gewebe entnehmen.¹⁷⁶ Auch für das Gewebe des Untersuchungsgegenstands (9055A-43) des Produzenten ORTA Anadolu liegt eine Ökobilanzierung vor.¹⁷⁷

Unternehmen	Jahr	Funktionelle Einheit	Climate Change (kg CO ₂ -eq.)
ORTA Anadolu	2018	Fabric 9002A-39, 1,5 m2	2,36
		Fabric 9049A-38, 1,5 m2	2,35
		Fabric 0009A-40, 1,5 m2	3,02
		Fabric 90055A-43, 1,5 m2 (MAIRAA)	2,08
ISKO	2018	Basic Fabric, 1,5 m2	2,82

Abb. 5: Gegenüberstellung der Denim-Ökobilanzen anhand der funktionellen Einheit und dem GWP-Ergebnis, Quelle: eigene Darstellung.

Diese Analyse beinhaltet die Prozesse innerhalb der Systemgrenze Cradle-to-Gate. Der Baumwollanbau, die Entkörnung, der Transport zu ORTA und alle Schritte der Gewebeproduktion sind dabei miteingeschlossen.¹⁷⁸ Als funktionelle Einheit dient 1 m Denim aus 100 % GOTS zertifizierter Biobaumwolle, was bei einer Warenbreite von 1,5

¹⁷³ Vgl. Hedman, E. (2018), S. 41.

¹⁷⁴ Vgl. Levi Strauss & Co. (2009), S. 11; Roos, S./ et. al. (2015), S. 46.

¹⁷⁵ Vgl. Roos, S./ et. al. (2015), S. 45.

¹⁷⁶ Vgl. ORTA Anadolu Tic. ve San. İřl. A.ř. (2018a), S. 7; Sanko Tekstil İřletmeleri San. ve Tic. A.ř (2018), S. 9.

¹⁷⁷ Vgl. ORTA Anadolu Tic. ve San. İřl. A.ř. (2019a).

¹⁷⁸ Vgl. ORTA Anadolu Tic. ve San. İřl. A.ř. (2019a), S. 2.

m einer Fläche von 1,5 m² entspricht. Dabei entstehen u. a. 2,08 kg CO₂-Äquivalent und 816 Liter Wasser werden benötigt.¹⁷⁹ Diese Ergebnisse werden mit den Resultaten der eigenen Analyse des entsprechenden Abschnitts abgeglichen, um eine höhere Belastbarkeit der Daten sicherzustellen.

Im Vergleich zu den anderen Stoffen des Herstellers ORTA, die bei AA Produkten eingesetzt werden, und einem Beispielgewebe von ISKO, die ebenfalls Stoffe für Jeansprodukte von AA liefern, schneidet das Gewebe des zu analysierenden Produkts in der Wirkungskategorie „Climate Change“ am besten ab (siehe Abb. 5). Im Bereich „Land Use“ und Eutrophierungspotential erzeugt das ISKO Gewebe den größten negativen Einfluss, was teilweise auf die Verwendung von konventioneller, anstatt Biobaumwolle zurückgeführt werden kann. Der Wasserverbrauch ist bei den verschiedenen Stoffen vergleichbar hoch.¹⁸⁰

4.5 Faser

Zur Bilanzierung der Faserebene der Biobaumwolle, die im Beispielprodukt dieser Arbeit als Rohstoff verwendet wird, existieren zwei zentrale, aufeinander aufbauende Studien von *Textile Exchange* (2015) und der *C&A Foundation* (2018). Die Untersuchung der *C&A Foundation* vergleicht Biobaumwolle, BCI-Baumwolle und konventionelle Baumwolle. Die Daten für die Biobaumwolle entstammen dabei ausschließlich der Untersuchung von *Textile Exchange*.¹⁸¹

Die erstellte Lebenszyklusanalyse umfasst den gesamten Anbau und das anschließende Entkörnen von 1000 kg Biobaumwolle.¹⁸² Dabei wird ein globaler Durchschnitt auf Basis von Werten aus den Anbaugebieten in der Türkei, Indien, China, Tansania und den USA berechnet.¹⁸³ Die Allokationen im Vordergrundsystem werden auf Basis des monetären Werts durchgeführt.¹⁸⁴ Als Wirkungskategorien werden GWP, AP, EP, Wasserverbrauch, primärer Energiebedarf, Human Toxicity Potential (HTP) und Eco-toxicity Potential (ETP) herangezogen.¹⁸⁵ Die Ökobilanz wurde mit der GaBi-Software erstellt und steht in der entsprechenden Datenbank zur Verfügung.¹⁸⁶ In der vorliegenden eigenen Analyse wird dieser Datensatz für die Modellierung des Rohstoffs genutzt.

¹⁷⁹ Vgl. ORTA Anadolu Tic. ve San. İşl. A.Ş. (2019a), S. 4.

¹⁸⁰ Vgl. Sanko Tekstil İletmeleri San. ve Tic. A.Ş. (2018), S. 6; ORTA Anadolu Tic. ve San. İşl. A.Ş. (2019a), S. 4. Siehe hierzu Anhang 2.

¹⁸¹ Vgl. C&A Foundation (2018), S. 4.

¹⁸² Vgl. Textile Exchange (2014), S. 14.

¹⁸³ Vgl. Textile Exchange (2014), S. 19.

¹⁸⁴ Vgl. Textile Exchange (2014), S. 22.

¹⁸⁵ Vgl. Textile Exchange (2014), S. 34.

¹⁸⁶ Vgl. Textile Exchange (2014), S. 20.

4.6 Zwischenfazit

Die analysierten Quellen auf Ebene des Jeansprodukts, des Denim-Gewebes und der Biobaumwollfaser liefern strukturelle und inhaltliche Anhaltspunkte, welche in die eigene Analyse mit einfließen.

Die Menge an bestehenden Analysen zeigt, dass das Thema Lebenszyklusanalyse in der Jeansindustrie bereits zur praktischen Anwendung kommt.¹⁸⁷ Da die Anzahl von Ökobilanzen weiter zunimmt, ist zu erwarten, dass künftig immer mehr Produkte Hinweise auf CO₂-Ausstoß oder Wasserverbrauch enthalten werden.¹⁸⁸ In Anbetracht dieser Annahme ist es für AA als Pionier im Nachhaltigkeitsbereich von großer Bedeutung zu den ersten Unternehmen zu gehören, die diese Daten erhebt und transparent kommuniziert. Andere Jeanslabel, die sich der Nachhaltigkeit verpflichtet haben, wie Nudie Jeans, MUD Jeans und Reformation, veröffentlichen entsprechende Zahlen bereits in unterschiedlichem Umfang.¹⁸⁹ Auch im Onlineshop von AA werden bereits Einsparungen in Bezug auf Wasser- und Energieverbrauch sowie CO₂-Verbrauch auf Faserebene, entsprechend der Daten von *Textile Exchange (2018)*, angegeben.¹⁹⁰ Die Informationen sind in diesem Kontext aufgrund der umfassenden textilen Produktionskette allerdings wenig aussagekräftig. Die im nächsten Kapitel folgende Ökobilanz einer Jeans von AA ermöglicht dem Unternehmen dem aktuellen Trend in der Nachhaltigkeitskommunikation der Jeansindustrie zu folgen.

¹⁸⁷ Vgl. Yacout, D./ et. al. (2016), S. 327.

¹⁸⁸ Vgl. Peters, G./ et. al. (2015), S. 22.

¹⁸⁹ Vgl. MUD Jeans International B.V. (2015); Hedman, E. (2018); The Reformation Inc. (o.J.).

¹⁹⁰ Vgl. Social Fashion Company GmbH (o.J.).

5. Ökobilanz einer Jeans

Die folgende eigens erstellte Ökobilanz folgt dem in Kapitel 3 vorgestellten Ablauf nach DIN EN ISO 14040 und 14044. Zunächst werden in 5.1 *Goal & Scope* alle methodischen Festlegungen erläutert. In der *Inventarmodellierung* im darauffolgenden Abschnitt 5.2 wird das detaillierte Vorgehen der Modellerstellung schrittweise beschrieben, um die Nachvollziehbarkeit der Untersuchung sicherzustellen. Zur *Wirkungsabschätzung* im Kapitel 5.3 wird zunächst die Auswahl der Wirkungskategorien erklärt. Auf Basis dessen erfolgt dann eine erste Auswertung der Ergebnisse. Die dabei herausgefilterten Auffälligkeiten werden anschließend zusammen mit den in 5.2 getroffenen unsicheren Annahmen einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, die den ersten Schritt der *Interpretation* in Kapitel 5.4 darstellt. Das daraus abgeleitete Optimierungspotential wird in das ursprüngliche Modell eingearbeitet, bevor die Darstellung der Endergebnisse erfolgt. Diese werden abschließend hinsichtlich der eingehenden Fragestellung interpretiert.

5.1 Goal & Scope

Die folgende Ökobilanz wird im Auftrag des mittelständischen Bekleidungsunternehmens Social Fashion GmbH für die Marke AA durchgeführt. Produktbezogene, inhaltliche Unterstützung erfolgt durch die Lieferanten ORTA Anadolu Tic. ve San. İ̇l. A.Ş., Denim Authority S.A. und Dystar Colours Distribution GmbH sowie durch AA selbst.

5.1.1 Ziel

AA hat sich ganzheitlich der Nachhaltigkeit verschrieben und vermarktet seine Produkte mit diesem Fokus. Um diesen Unique Selling Point (USP) qualitativ und glaubwürdig zu kommunizieren, werden regelmäßig produktspezifische Nachhaltigkeitsdaten benötigt. Da diese Informationen aktuell nicht bekannt sind, greift das Unternehmen auf generische Daten von Textile Exchange zurück.¹⁹¹ Um die konkreten Umweltauswirkungen der eigenen Lieferketten transparent und glaubwürdig kommunizieren zu können, sollen diese Daten nun zunächst anhand eines Beispielprodukts, einer Damen-Jeans, vom Rohstoff bis zur Entsorgung erfasst werden.

In erster Linie besteht die Zielgruppe der vorliegenden Studie aus bestehenden und potentiellen AA-Kunden. Da diese häufig und in hohem Maße nachhaltigkeitsaffin sind, ist die glaubwürdige und aussagekräftige Kommunikation von Nachhaltigkeitskennzahlen von besonderer Bedeutung, um sich von anderen Unternehmen

¹⁹¹ Vgl. Textile Exchange (2014).

abzugrenzen.¹⁹² Durch die Kommunikation der Endergebnisse sollen Kunden zudem angeregt werden, das eigene Nutzungsverhalten von Alltagskleidung zu hinterfragen. Zusätzlich sollen die erfassten Daten in Zukunft zur Hotspot-Analyse und zur Evaluation von Prozessinnovationen entlang der Lieferkette genutzt werden.¹⁹³ Dementsprechend bilden das Produkt-, Supplychain- und CSR-Management sowie die Geschäftsleitung von AA die zweite Zielgruppe.¹⁹⁴ Durch die Kommunikation der Ergebnisse an die dritte Zielgruppe, welche sämtliche Lieferanten entlang der Lieferkette einschließt, können diese ebenfalls von den Erkenntnissen profitieren und ihre Produktion umweltfreundlicher gestalten.

Gemäß dieser Zielsetzung wird für die Analyse ein attributiver Ansatz gewählt, da sich die Fragestellung auf die direkte Wirkung des Produktsystems bezieht, ohne die Berücksichtigung von Effekten auf umliegende Systeme.¹⁹⁵

5.1.2 Produktbeschreibung

Als Untersuchungsgegenstand wird das Damen-Jeansmodell MAIRAA in der Farbe faded blue aus 100 % GOTS zertifizierter Biobaumwolle herangezogen, da es sich mit einem geplanten jährlichen Absatz von 20.000 Stück um das absatzstärkste Jeansmodell von AA handelt.¹⁹⁶ Die Produktgruppe Jeans wurde aufgrund der in Kapitel 2.2 *Jeansproduktion unter ökologischen Gesichtspunkten* beschriebenen massiven Umweltauswirkungen ausgewählt.

Produktgruppe	Produktbestandteil	Material	Gesamtgewicht (g)
Gewebe	9055A-43	100% GOTS zertifizierte Biobaumwolle	724,54 g
Futterstoff	Lining	100% GOTS zertifizierte Biobaumwolle	27,06 g
Einlage	Interlining	Polyester (Annahme)	12,85 g
Garn	Topstiching	Polyester	20,64 g
Zutaten	Reißverschluss	Messing/ Polyester	7,55 g/ 1,22 g
	Knopf	Edelstahl	3,18 g
	Nieten	Edelstahl	4,24 g
Label	Mainlabel	70% Biobaumwolle/ 30% recyceltes Polyester	0,18 g
	Size Label	70% Biobaumwolle/ 30% recyceltes Polyester	0,04 g
	Care Label	100% recyceltes Polyester	2,14 g
	Waistband/ Joker Tag	100% GOTS zertifizierte Biobaumwolle	5,33 g
	Jacron Label (Badge)	80% Cellulose, 20% Latex	1 g
	Hangtag	100% Papier	6,12 g
Verpackung	Polybag	100% recyceltes Polyester	11,23 g
	Aufkleber	100% Papier	0,14 g

Abb. 6: Übersicht Produktbestandteile des Untersuchungsgegenstands, Quelle: eigene Darstellung.

Das Endprodukt besteht aus 724,54 g Gewebe, 344 m Nähgarn, 27,06 g Taschenfutter,

¹⁹² Vgl. Schrott, P./ Paul, R. (2015), S. 564.

¹⁹³ z. B. Variationen der Fasermischungen.

¹⁹⁴ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 27.

¹⁹⁵ Vgl. Peters, G./ et. al. (2015), S. 6.

¹⁹⁶ Vgl. Muth, L. (2020).

einem Reißverschluss, vier Nieten, einem Knopf, fünf verschiedenen Labels, einem Hangtag und einer Verpackung aus recyceltem Polyester (siehe Abb. 6).¹⁹⁷

5.1.3 Produktsystembeschreibung und Systemgrenzen

Die Systemgrenzen der vorliegenden Ökobilanz umfassen entsprechend der Zielsetzung den gesamten Produktlebenszyklus Cradle-to-Grave von der Fasergewinnung bis zum End-of-life.¹⁹⁸

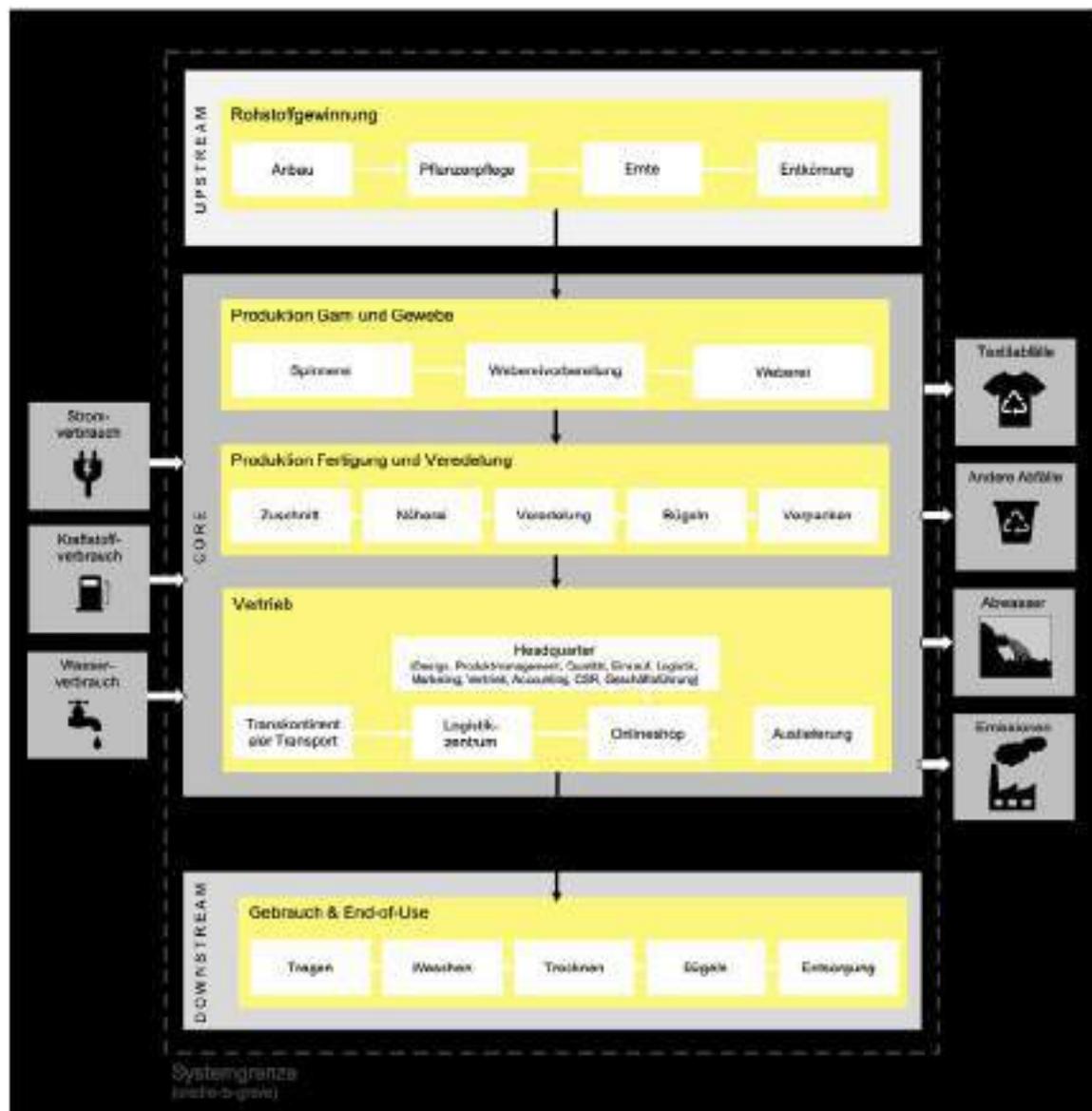


Abb. 7: Flowchart Lebenszyklus MAIRAA, Quelle: eigene Darstellung.

Auch wenn die in Kapitel 3.3 *Bezugsrahmen der vorliegenden Analyse* beschriebene PCR die Berücksichtigung der Nutzungs- und Entsorgungsphase nicht vorschreibt, u.

¹⁹⁷ Vgl. ORTA Anadolu Tic. ve San. İşl. A.Ş. (2018b); Social Fashion Company GmbH (2019a). Das Gewicht wurde durch eine eigene Messung bestimmt. Siehe hierzu Anhang 3.

¹⁹⁸ Vgl. Roos, S./ et. al. (2015), S. 10; Schrott, W./ Paul, R.(2015), S. 563; Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 84.

a. da sie stark vom Konsumentenverhalten abhängig sind, werden diese in der vorliegenden Analyse miteingeschlossen. So wird sichergestellt, dass Lastenverschiebungen innerhalb der Produktionskette mitbilanziert werden.¹⁹⁹

Für die in der Zielsetzung der Untersuchung enthaltene Gegenüberstellung unterschiedlichen Nutzungsverhaltens, wird die Modellierung der Gebrauchsphase ebenfalls benötigt.²⁰⁰ Bestehende Studien belegen außerdem, dass in den letzten beiden Produktlebensphasen erhebliche Umweltauswirkungen verursacht werden.²⁰¹ Des Weiteren zeigt die Literaturanalyse in Kapitel 4 *Stand der Forschung*, dass die Mehrheit der Ökobilanzen über Jeans in diesem Rahmen erhoben wird.

Alle miteingeschlossenen Produktionsschritte inklusive Material-, Energie-, Wasser- und Emissionsströmen sind in Abb. 7 dargestellt. Die Einteilung der Lieferkette erfolgt gemäß der PCR in Upstream-, Core- und Downstreamprozesse.²⁰²

Die Rohstoffgewinnung der Biobaumwolle, erfolgt in der Türkei und umfasst den Anbau, die Bodenvorbereitung, die Aussaat, die Pflanzenpflege, die Ernte und die Entkörnung. Die entkörnte Baumwolle wird in gepressten Ballen per LKW (> 32 t) über eine Strecke von 820 km zu ORTA Anadolu in Kayseri in der Türkei geliefert, dort zunächst geöffnet, in einzelne Faserbündel zerteilt, von groben Verunreinigungen gereinigt und gemischt (Putzerei/ Blow room).²⁰³ Während des anschließenden Kardierens werden die einzelnen Fasern separiert, parallelisiert und kurze Fasern, sowie Verunreinigungen entfernt (carding).²⁰⁴ Zur Vorbereitung des Spinnprozesses werden die Fasern gestreckt (drawing), gekämmt (combing) und zu einem Vorgarn versponnen (roving).²⁰⁵ Es folgt das eigentliche Spinnen des Schuss- und Kettgarns auf einer Ringspinnmaschine. Anschließend wird das Garn aufgespult und fixiert (winding & fixation).²⁰⁶ Zur Vorbereitung der Färberei des Kettgarns findet das Schären (ball warping) statt.²⁰⁷ Dabei wird der Kettfaden zu parallel liegenden, gleichlangen Fäden verbunden und auf zylinderförmigen Trommeln aufgerollt.²⁰⁸ In der Strangfärberei (rope dyeing) werden die parallelisierten Fäden anschließend abgerollt und durch ein alkalisches Bad geführt,

¹⁹⁹ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 5; Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 84.

²⁰⁰ Siehe Abschnitt 5.1.1 *Ziel*.

²⁰¹ Vgl. Levi Strauss & Co. (2009), S. 10 f.; Roos, S./ et. al. (2015), S. 46; Hedman, E. (2018), S. 41. Siehe Kapitel 4.3 *Jeans Produkt*.

²⁰² Vgl. EPD International AB (2019), S. 12. Siehe Kapitel 3.3 *Bezugsrahmen der vorliegenden Analyse*.

²⁰³ Vgl. McLoughlin, J./ et. al. (2015), S. 21; Onder, N.S. (2020), Mail vom 31.10.19; Onder, N. S. (2020) Mail vom 14.11.19.

²⁰⁴ Vgl. McLoughlin, J./ et. al. (2015), S. 22 f.; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 131; Onder, N. S. (2020), Mail vom 31.10.19, Onder, N. S. (2020), Mail vom 27.11.19.

²⁰⁵ Vgl. Onder, N. S. (2020), Mail vom 31.10.19

²⁰⁶ Vgl. Onder, N. S. (2020), Mail vom 31.10.19; Onder, N.S. (2020), Mail vom 30.01.20.

²⁰⁷ Vgl. Orta Anadolu Tic. ve San. İşl. A.Ş. (2020).

²⁰⁸ Vgl. McLoughlin, J./ et. al. (2015), S. 31; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 132.

gewaschen und dann in acht Färbebecken mit Indigo und Sulfur Black gefärbt (siehe Abb. 8).²⁰⁹ Das Färbebad wird mit Feuchthaltemitteln (wetting agent) aus Fettalkoholen und aus einer Phosphorsäure-Esther-Lösung, Natriumhydroxid, kristallisierter Glucose als Reduktionsmittel und Natrium-Polyacrylat als Stabilisator versetzt, um das Färberegebnis zu optimieren.²¹⁰

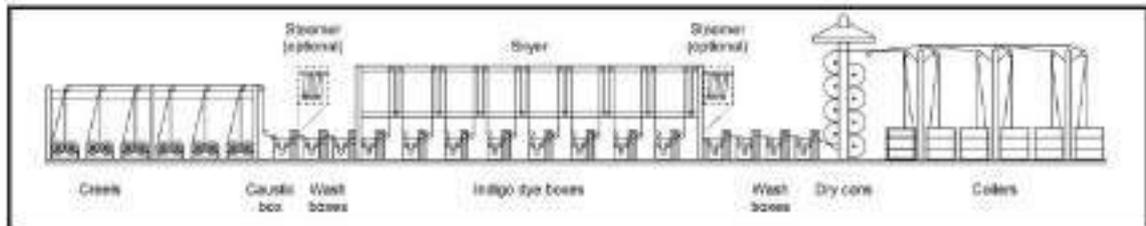


Abb. 8: Rope Dyeing Prozess, Quelle: Meksi, N./ Mhenni, M.F. (2015), S. 76.

Nach der Wiederherstellung der Fadenschar mit Hilfe eines Long Chain Beamers, wird Schlichte aus Polyacrylsäure-Copolymer, Kartoffelstärke und Natrium-Carboxymethylcellulose aufgebracht, um den Faden vor der mechanischen Beanspruchung im Webstuhl zu schützen.²¹¹ Das Schussgarn wird nach der Spinnerei nicht weiter behandelt. In der Weberei wird auf einer Greifer-Webmaschine ein Denimgewebe mit einer 3/1 Körperbindung in Z-Richtung erzeugt. Bevor dieser Produktionsschritt mit der Qualitätskontrolle und der Verpackung abgeschlossen wird, findet das Krumpfen des Gewebes statt (Sanforization), um späteres Einlaufen zu minimieren. Dafür werden Fettalkohole als Feuchthaltemittel (wetting agent), eine Emulsion aus Wasser und Polyethylen, Zitronensäure und pflanzliche Stearate als Weichmacher eingesetzt.²¹² Der Transport des Gewebes nach Ras Jebel in Tunesien zu Denim Authority S.A. erfolgt per Containerschiff und LKW.²¹³ Bei Denim Authority S.A. angekommen wird das Denimgewebe zunächst einer Qualitätskontrolle unterzogen. Anschließend werden Lagen gelegt und der Zuschnitt der einzelnen Komponenten erfolgt. Die Einzelteile werden danach schrittweise und arbeitsteilig zusammengenäht. Die Veredelung findet durch verschiedene abwechselnde Nass- und Trockenprozesse statt, die Teile des Indigofarbstoffs von der Gewebeoberfläche entfernen. Dabei werden Laser eingesetzt, es finden manuelle Schleifprozesse statt, die Jeans werden besprüht, mehrmals gewaschen und gebleicht. Abschließend werden die Nieten, der Knopf und das Jacron angebracht und das Produkt wird gebügelt. Nach der abschließenden Qualitätskontrolle werden Zusatzetiket-

²⁰⁹ Vgl. Meksi, N./ Mhenni, M. H. (2015), S. 75; Orta Anadolu Tic. ve San. İŞl. A.Ş. (2020).

²¹⁰ Vgl. Orta Anadolu Tic. ve San. İŞl. A.Ş. (2020).

²¹¹ Vgl. Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 574; Orta Anadolu Tic. ve San. İŞl. A.Ş. (2020).

²¹² Vgl. Orta Anadolu Tic. ve San. İŞl. A.Ş. (2020).

²¹³ Vgl. Social Fashion Company GmbH (2019c).

ten angebracht und die Jeans erhält ihre finale Verpackung aus recyceltem Polyester.²¹⁴

Das fertige Produkt wird per LKW zum Hafen gebracht, per Schiff von Tunis nach Genua geliefert und per LKW nach Aurach in Süddeutschland in das AA-Lager bei Loxxess transportiert.²¹⁵ Die im Onlineshop bestellte Ware wird kommissioniert, verpackt und anschließend mit DHL Green zum Kunden verschickt. Die Bereitstellung des Onlineshops, sowie der Betrieb des Headquarters, in dem das Design, das Produkt-, Qualitäts- und CSR-Management, der Einkauf, die Logistik, das Marketing, das Accounting und die Geschäftsführung angesiedelt sind, werden ebenfalls mitbilanziert, da diese im unmittelbaren Einflussbereich von AA liegen, sodass potentielle Verbesserungen hier leicht umgesetzt werden können. Benötigte Flugreisen, die explizit für die Erstellung des Produktes getätigt werden, fließen ebenfalls mit in die Analyse ein, da es sich bei Flügen und den damit verbundenen Emissionen um ein aktuell relevantes Thema der gesellschaftlichen Nachhaltigkeitsdebatte handelt und somit im potentiellen Interesse der Kundenzielgruppe liegt.²¹⁶ Für die Modellierung der anschließenden Gebrauchsphase werden zunächst durchschnittliche Waschgewohnheiten angenommen die entsprechend der Zielsetzung in der anschließenden Sensitivitätsanalyse anderen Konsummustern gegenübergestellt werden. Die Entsorgung der Jeans umfasst die Abgabe, Sortierung und Weiterverwertung als Secondhand Gesamtprodukt, als Downcycling Produkt oder in der thermischen Verwertung. Die jeweiligen Inputs und Outputs werden in der Inventaranalyse in Kapitel 5.2 beschrieben.

Gemäß der PCR werden während des gesamten Produktlebenszyklus die Bereitstellung von Anlagen und Maschinen sowie entsprechender Immobilien und die Arbeitswege des Personals ausgeklammert.²¹⁷ Die Produktion aller verwendeten Verpackungen, Chemikalien und Hilfsstoffe ist in der Analyse berücksichtigt. Die dazugehörigen Transportwege zum Einsatzort werden jedoch aufgrund der mangelnden Abschätzungsgrundlage und geringer erwarteter Auswirkungen ausgeklammert.²¹⁸

Aufgrund der internationalen Verteilung der Lieferkette gelten als geographische Systemgrenze die jeweiligen Länder, denen die Lebenszyklusabschnitte zuzuordnen sind (Türkei, Tunesien, Deutschland). Entsprechend werden bei der Modellierung länderspezifische Datensätze bevorzugt.²¹⁹ Bei der Erhebung der Primärdaten gilt das Jahr 2018 als zeitlicher Bezugsrahmen, da das Jahr 2019 zu Beginn der Datenerhebung noch nicht abgeschlossen ist.

²¹⁴ Vgl. Denim Authority S. A. (2019).

²¹⁵ Vgl. Social Fashion Company GmbH (2019c).

²¹⁶ Vgl. Raab, K. (2019); Strittmacher, K. (2019).

²¹⁷ Vgl. Klöpffer, W./Grahl, B. (2009), S. 30; EPD International AB (2019) S. 10.

²¹⁸ Vgl. EPD International AB (2019), S. 10.

²¹⁹ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 30, 56.

5.1.4 Abschneidekriterien

Insgesamt sollen alle Inputs innerhalb der Systemgrenzen inkludiert werden, die mehr als 1 % der Umweltwirkung des beabsichtigten Outputs im jeweiligen Prozess ausmachen. Parallel sollte die Summe der abgeschnittenen Prozesse nicht mehr als 5 % des jeweiligen Outputs ausmachen, um Verfälschungen zu vermeiden. Da die ökologischen Folgen zu Beginn der Modellierung unbekannt sind, werden für deren Abschätzung die Kriterien Masse und Energie herangezogen.²²⁰ Zudem wird die Datenverfügbarkeit in die Entscheidung über Abschneiden oder Berücksichtigen miteinbezogen. Liegen passende Datensätze für theoretisch abzuschneidende Prozesse vor, werden diese aufgrund der leichten Verfügbarkeit in die Analyse eingeschlossen.²²¹

5.1.5 Funktionelle Einheit und Referenzfluss

Als funktionelle Einheit wird eine Damen-Jeans in Größe 27/32, die der Kundin über 191 Gebrauchszyklen zur Verfügung steht, definiert.²²² Der Nutzen des Produktsystems besteht darin, die Beine und den Unterleib der Kundin zu bedecken und diesen vor äußeren Einflüssen, wie z. B. Kälte, Feuchtigkeit oder Verletzungen, zu schützen. Der entsprechende Referenzfluss liegt bei 647 g nutzbare Jeans.

5.1.6 Allokationsverfahren

Allokationen werden in der vorliegenden Analyse gemäß DIN EN ISO 14044 in den meisten Fällen durch Systemraumerweiterung vermieden, indem die Primärproduktion des nicht verwendbaren Outputs gutgeschrieben und somit vom Ergebnis subtrahiert wird. Ist dieser Vorgang nicht praktikabel, werden die Outputs anhand von physikalischen Beziehungen gewichtet.²²³ Sind in der Modellierung von Prozessen Allokationsverfahren enthalten, sind diese in der Inventaranalyse in Kapitel 5.2 beschrieben.

5.1.7 Wirkungskategorien

Zur Abschätzung der Umweltwirkung und zur Auswertung der durchgeführten Untersuchung werden die in Abb. 9 gelisteten Kriterien herangezogen. Detailliertere Ausführungen zu den einzelnen Wirkungskategorien und deren Anwendung befinden sich in Kapitel 5.3.1 *Wirkungskategorien und Relevanz*.

²²⁰ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 55; EPD International AB (2019), S. 12.

²²¹ Siehe auch Kapitel 5.1.8 *Datenerhebung*.

²²² Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Gebrauchphase“.

²²³ Vgl. Klöpffer/ Grahl, S. 56; DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 24.

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Einheit	Beispiele für Emissionen entsprechender Wirkung
Global warming potential (GWP)	GWP 100, CML 2001, Update 2016, Verstärkung des Strahlungsantriebs durch absorbierte Wärmestrahlung.	kg CO ₂ -eq.	CO ₂ , H ₂ O, CH ₄ , N ₂ O, O ₃ (troposphärisch)
Acidification potential (AP)	CML 2001, Update 2016, Freisetzung von Protonen (H ⁺ _{aq}).	kg SO ₂ -eq.	SO ₂ , NO _x , NH ₃ , HF, HCl
Eutrophication potential (EP)	CML 2001, Update 2016, Bestimmung der relativen Düngewirkung.	kg PO ₄ ³⁻ -eq.	NO, NO ₂ , NO _x , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , N, PO ₄ ³⁻ , P.
Land use	Environmental Footprint 2.0, Indikator aus Erosionsbeständigkeit, mechanische Filtrationseigenschaften, Grundwasserregeneration & biotische Produktion, gleiche Gewichtung, in Anlehnung an LANCA Modell (Bos/ et.al. (2016)).	Pt.	
Water scarcity	Environmental Footprint 2.0, Wasserverbrauch unter Berücksichtigung der Verknappung, in Anlehnung an AWARE Modell (UNEP, (2016)).	m ³ world eq.	

Abb. 9: Tabellarische Aufstellung Wirkungskategorien, Quelle: eigene Darstellung, nach Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 252 ff.; Fazio, S./ et. al. (2018), S. 22 ff.

5.1.8 Datenerhebung

Die verwendeten Daten werden möglichst standortbezogen in den Betrieben der Lieferkette erfasst. Fehlen hierbei Angaben, werden begründete Annahmen auf Basis von wissenschaftlichen Publikationen oder Industrieangaben getroffen.²²⁴ Die so erfassten Inputs und Outputs werden auf Basis der hinterlegten Prozesse und Pläne der GaBi-Datenbank modelliert. Im Falle unvollständiger oder fehlender Datensätze von Vorprodukten werden diese anhand der industrieüblichen Produktionsverfahren nachmodelliert. Sind diese Details ebenfalls nicht verfügbar, werden chemische und physikalische Grundlagen zur Abschätzung herangezogen. Die für die Abschätzung notwendige Detailtiefe wird in Abhängigkeit zum voraussichtlichen Einfluss des Datensatzes auf das Gesamtergebnis gestellt.

Die Informationen zur Modellierung der Rohstoffherzeugung stammen aus einem generischen Datensatz von Textile Exchange, da kein direkter Kontakt zu den Baumwollproduzenten hergestellt werden konnte. Die Input- und Outputdaten zu Material- und Energieflüssen der Produktherstellung (Spinnerei, Webereivorbereitung, Weberei, Konfektion, Veredelung, Vertrieb und Distribution) werden primär erhoben. Diese stammen aus Befragungen von Lieferanten, da eine eigene On-site-Erfassung aufgrund von erheblicher örtlicher Distanz und begrenzten Ressourcen nicht realisiert werden konnte. Die Informationen von ORTA wurden hauptsächlich über eine bestehende, aufgearbeitete Input-Output-Tabelle kommuniziert, die für deren Erstellung der EPDs bereits vorlag.²²⁵ Darauf folgende Detailfragen wurden per E-Mail beantwortet.²²⁶ Denim Authority wurde im ersten Schritt eine tabellarische Auflistung der Prozesse und der

²²⁴ Vgl. EPD International AB (2019), S. 13.

²²⁵ Vgl. ORTA (2019a).

²²⁶ Vgl. Onder, N. S. (2020).

benötigten Informationen zur Verfügung gestellt, die durch entsprechende Daten ergänzt werden sollte.²²⁷ Da die Ergebnisse Lücken und inhaltliche Widersprüche enthielten, wurde die Datenerfassung in Rücksprache mit den Verantwortlichen im zweiten Schritt auf die entscheidenden Leitfragen herunter gebrochen.²²⁸ Die daraufhin erhaltenen Informationen sind im elektronischen Anhang der vorliegenden Arbeit einsehbar.²²⁹ Um zusätzliche Informationen zu erhalten, wurden auch Zutaten- und Chemikalienlieferanten kontaktiert.²³⁰ Die produktspezifischen Informationen werden durch Dokumente der Produktentwicklung und Qualitätssicherung von AA ergänzt. Die Daten bezüglich des Vertriebs sowie des Headquartiers stammen aus den Jahresabrechnungen von 2018 und sind auf die Anzahl produzierter Kleidungsstücke umgelegt. Die entsprechenden Verbrauchsdaten des Distributionspartners Loxxess liegen ebenfalls vor.

Alle erfassten Informationen sind zur besseren Übersicht in dem Dokument „Prozessübersicht Modellierung“ im elektronischen Anhang zusammengefasst.²³¹ Da die primären Daten größtenteils auf Angaben der Produzenten beruhen, lässt sich deren Genauigkeit bzw. Reliabilität kaum überprüfen. Zur Verifizierung wird die Konsistenz der erhaltenen Informationen kontrolliert. Der insgesamt hohe Anteil an Primärdaten ermöglicht eine präzise Analyse des Untersuchungsgegenstands.

Im Rahmen der Inventaranalyse im folgenden Abschnitt ist das Vorgehen bei der Modellierung der jeweiligen Prozesse im Detail aufgeführt.

²²⁷ Siehe im elektronischen Anhang: „Data collection sheet.xlsx“.

²²⁸ Vgl. Zlitni, S. (2020a); Zlitni, S. (2020b).

²²⁹ Vgl. Denim Authority S.A. (2020a); Denim Authority S.A. (2020b); Denim Authority S.A. (2020c); Denim Authority S.A. (2020d).

²³⁰ Vgl. Marchesin, S. (2020); Piorko, L. (2020); Schmidt, A. J. (2020).

²³¹ Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xlsx“

5.2 Inventaranalyse (LCI)

5.2.1 Softwarebeschreibung

Für die Modellierung der Inventardaten wird eine Professionals-Version der Ökobilanzierungssoftware GaBi ts, Version 8.7, des Herstellers Thinkstep GmbH genutzt. GaBi gehört laut der Einschätzung von *Lüdemann, L./ Feig, K.* zu den Marktführern im LCA-Bereich.²³² Die verwendeten Hintergrundprozesse entstammen entsprechend der GaBi Professionals Datenbank 2019, die gemäß Herstellerangaben mit 12.500 Einheiten die größte qualitativ hochwertige Sammlung von LCA-Datensätzen der Welt darstellt.²³³ Außerdem werden Informationen aus den Softwareerweiterungen „VII: Plastics 2019“, „X: Machining Processes 2019“ und „XII: Renewable Materials 2019“ herangezogen. Datensätze von Thinkstep werden dabei den von der Industrie bereitgestellten Datensätzen vorgezogen, um mögliche Tendenzen eines Interessenkonflikts innerhalb der Prozesse zu umgehen und um einheitlich zu agieren.

5.2.2 Inventarmodellierung

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Schritte der Modellierung detailliert erläutert, um die Nachvollziehbarkeit der Vorgehensweise zu dokumentieren. Einzelheiten der Datenerhebung sowie die jeweiligen In- und Outputs werden dabei beschrieben. Diese Ausführung klärt die Frage warum welche Prozesse auf die gewählte Art und Weise modelliert wurden. Eine tabellarische Übersicht aller genutzten Datensätze befindet sich in Anhang 3 und im elektronischen Anhang als Excel-Datei. Die Inventarmodellierung erfolgt entlang der in Kapitel 5.1.3 *Produktsystembeschreibung und Systemgrenzen* beschriebenen und in Abb. 7 dargestellten Lebenszyklusabschnitte Fasergewinnung, Spinnerei, Weberei-Vorbereitung (u. a. Färberei), Weberei, Konfektion, Veredelung, Distribution, Vertrieb, Gebrauch und Produktlebensende. Die Transportwege werden zwischen den Stufen als eigene Prozesse eingefügt.

Stehen mehrere vergleichbare Datensätze zur Abbildung von Prozessen zur Verfügung, werden jene mit höheren Umweltlasten bevorzugt, um das Risiko zu vermindern, dass Umweltauswirkungen unterschätzt werden.

Faseranbau

Der Faseranbau wird als Upstream-Prozess, der sich außerhalb des direkten Einflussbereichs des Unternehmens befindet, durch den Datenbankprozess „GLO: Cotton fiber (organic) (at ginned gate) Textile Exchange“ dargestellt. Der Prozess umfasst die Schritte des Baumwollanbaus inklusive Feldvorbereitung, Anpflanzen, Feldarbeit und Ernte, sowie den Transport zum Entkörnen und den Entkörnungsprozess selbst. Der

²³² Vgl. *Lüdemann, L./ Feig, K.* (2014), S. 4.

²³³ Vgl. Thinkstep GmbH (2019a).

Datensatz basiert auf einer Studie des Branchennetzwerks Textile Exchange von 2014, die eine Bilanzierung des globalen durchschnittlichen Biobaumwollanbaus durchführt.²³⁴ Der geographische Rahmen kann an dieser Stelle aufgrund mangelnder Verfügbarkeit spezifischer Daten für die Türkei nicht aufrecht erhalten werden. Der Anteil türkischer Biobaumwolle am globalen Durchschnitt beträgt 6,5 %.²³⁵ Unter näherer Betrachtung der globalen Werte wird deutlich, dass für die Produktion türkischer Biobaumwolle weniger Düngemittel eingesetzt, stattdessen jedoch mehr Diesel benötigt wird; dafür fällt der Ertrag vergleichsweise hoch aus.²³⁶ Diese Informationen spiegeln den relativ hohen Industrialisierungsstand des türkischen Biobaumwollanbaus wieder und sollten bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Transportstrecke innerhalb der Türkei

Anschließend wird die entkörnte Biobaumwolle in Ballen über eine Distanz von 820 km zu ORTA Anadolu in Kayseri gebracht.²³⁷

Transporte LKW

Alle Transporte, unabhängig von dem Transportmittel, werden als durchreichende Prozesse konzipiert, die eine Ladung eines bestimmten Gewichts als Input und Output listen, wobei der jeweilige Treibstoff ebenfalls als Input mit einfließt.

Alle LKW Transportwege werden anhand der vorgeschlagenen Route bei Google Maps abgeschätzt. Die LKW-Transporte, die in der Türkei stattfinden werden mit dem Datensatz „GLO: Truck-trailer, EURO 4, 28-34 t gross weight/ 22 t payload capacity“ mit entsprechend eingestellter Distanz abgebildet. Die Emissionsklasse EURO 4 wurde für die Transporte in der Türkei, aufgrund einer Schätzung, basierend auf Informationen von EUROSTAT über das Alter der 2017 in der Türkei zugelassenen LKW und den Genehmigungsdaten der Emissionsklassen, ermittelt.²³⁸ Für die Türkei ergibt sich daraus eine rechnerische Emissionsklasse von 4,28.²³⁹

Zur Abschätzung der durchschnittlichen LKW-Emissionsklasse in Tunesien wurden die LKW-Neuzulassungen von 1991 bis 2016 verwendet.²⁴⁰ Daraus wird ein theoretischer Wert von 3,56 errechnet.²⁴¹ Um die Differenz zwischen den Werten abzubilden, werden

²³⁴ Vgl. Textile Exchange (2014), S. 14. Siehe auch Abschnitt 4.5 *Fasern*.

²³⁵ Vgl. Textile Exchange (2019), S. 19.

²³⁶ Vgl. Textile Exchange (2019), S. 68 f.

²³⁷ Vgl. Onder, N. S. (2020), Mail vom 12.11.2019.

²³⁸ Vgl. Umweltbundesamt (2015); Eurostat (2019). Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang LKW“.

²³⁹ Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang LKW“.

²⁴⁰ Vgl. Umweltbundesamt (2015); Institut National de la Statistique Tunisie (2016). Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang LKW“.

²⁴¹ Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang LKW“.

die Transporte in Tunesien mit „GLO: Truck-trailer, EURO 3, 28-34 t gross weight/ 22 t payload capacity“ abgebildet und ebenfalls hinsichtlich Transportdistanz eingestellt. Sollte die Analyse der Umweltwirkungen zeigen, dass die Transportwege in der Türkei und Tunesien einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtemissionen des Produkts haben, sollten die Transportwege im Rahmen der Sensitivitätsanalyse genauer betrachtet werden, da die Emissionsklassen auf einer groben Schätzung beruhen. Für die LKW Transportstrecken in Deutschland liegen Angaben der beauftragten Spedition vor, die für den Transport EURO 6 als Emissionsklasse nennt.²⁴² Dem-entsprechend wird der Datensatz „GLO: Truck-trailer, EURO 6, 28-34 t gross weight/ 22 t payload capacity“ verwendet. Allen verwendeten LKW Datensätzen wird „EU-28: Diesel mix at refineries“ als Treibstoff zugeführt.

Strom- und Dampferzeugung bei der Gewebeproduktion

Da die Verarbeitungsschritte der Spinnerei, Webereivorbereitung und Weberei weiterhin in der Türkei stattfinden, sollten für die Prozesse bevorzugt länderspezifische Daten verwendet werden. Zwar fehlen hierfür Datenbankprozesse, da die Energie und der Dampf bei ORTA Anadolu jedoch aus einem produktionseigenen Heizkraftwerk stammt, kann der geografische Rahmen bei der Energiebereitstellung eingehalten werden. Zur Modellierung der Anlage wurden von ORTA bereitgestellte Informationen auf einen Input von 1 MJ Erdgas skaliert und in den Datensatz „EU-28: Thermal energy from natural gas“ übertragen. Bei einem Input von 1 MJ Erdgas werden 0,06 kg Wasser benötigt, um 0,29 MJ Elektrizität und 0,4 MJ Dampf zu erzeugen (siehe Abb. 10).²⁴³

„TR: Cogeneration ORTA“				
Input			Output	
Water, completely softened	0,05889	kg	Cogen_ORTA Anadolu_Electricity- _2017	0,28795 MJ
Natural gas, burned in cogen	1	MJ	Cogen_ORTA Anadolu_Steam- _2017	0,40516 MJ

Abb. 10: Tabellarische Input-Output-Übersicht Heizkraftwerk ORTA, Quelle: eigene Darstellung, in Anlehnung an ORTA Anadolu Tic. ve San. İ̇şl. A.Ş. (2019a).

In einigen Fällen stimmt das erzeugte Mengenverhältnis der Dampf- und Stromerzeugung nicht mit dem Bedarf überein oder Prozesse benötigen ausschließlich Strom. Um diese Fehlbeträge zu umgehen bzw. auszugleichen werden zwei zusätzliche Pläne geschaffen, die aus dem Heizkraftwerk-Prozess ausschließlich Strom oder Dampf generieren. Dabei wird der ursprüngliche Prozess mit Energie-Invertern verknüpft, um darüber eine Gutschrift für Dampf bzw. für Strom erzeugen. Die Inverter beinhalten als Input zweimal den gleichen Energiebetrag jeweils als positiven und negativen Wert. Die jeweils nicht genutzte Energiequelle geht als positiver Betrag in den Inverter ein.

²⁴² Vgl. Meyer & Meyer Holding SE & Co. KG (2020), S. 10.

²⁴³ Vgl. ORTA Anadolu Tic. ve San. İ̇şl. A.Ş. (2019b). Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Cogeneration“.

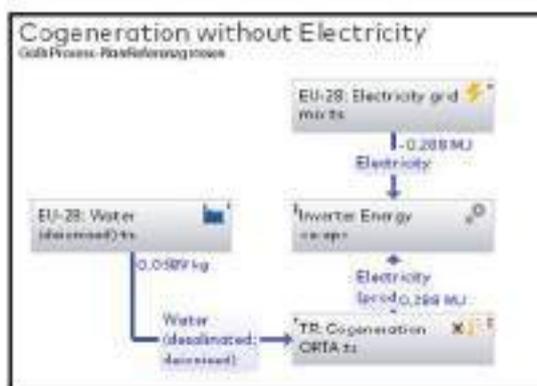


Abb. 11: Modellierung Heizkraftwerk in GaBi, Quelle: eigene Modellierung.

Die gleiche Menge wird als negativer Beitrag aus dem Prozess der primären Energieerzeugung zugeführt und gleicht den positiven Betrag rechnerisch aus (siehe Abb. 11). Dieses Vorgehen beruht auf der Idee, dass die ohnehin entstehenden Energien, die hier nicht unmittelbar genutzt werden, an anderer Stelle eingesetzt werden und dort entsprechend weniger Strom und Dampf produziert werden muss.

Wasser und Abwasser in der Gewebeproduktion

Benötigen Prozesse der Gewebeproduktion als Input Wasser, wird dieses durch "EU-28: Tap water from groundwater ts" modelliert, da kein für die Türkei spezifischer Datensatz verfügbar ist. Die Entscheidung für Grundwasser als Bezugsquelle beruht auf Informationen einer Untersuchung von Uyak, V./ et. al. bezüglich Wassermanagement in Kayseri, die besagt, dass 99 % der Wasserversorgung der Stadt auf Grundwasser beruht.²⁴⁴ Die Abwasserbehandlung erfolgt bei ORTA in zwei Schritten: Zunächst findet vor Ort eine biologische Abwasserbehandlung statt, bevor das Abwasser der kommunalen Kläranlage zugeführt wird.²⁴⁵ Zur Abwassermodellierung werden auf dem Plan „EU-28: Waste water treatment (biological + municipal) ORTA“ entsprechend zwei Prozesse zur Abwasserbehandlung hintereinander geschaltet. Um einen Abwasserprozess zu erhalten, der einen Produktfluss Wasser als Output enthält, der weiter verbunden werden kann, wird der Datenbankprozess „EU-28: Municipal waste water treatment (mix) ts“ modifiziert. Der ursprüngliche Elementarfluss 1 kg „Proceed water to river (other emissions to fresh water)“ wird in einen Produktfluss umgewandelt und anschließend einer zweiten Kläranlage zugeführt. Diese wird mit dem ursprünglichen, nicht modifizierten Datensatz „EU-28: Municipal waste water treatment (mix) ts“ dargestellt. Zwar ist in der Beschreibung des Datensatzes angegeben, dass der Prozess sich nicht zur Modellierung stark verschmutzter Industrieabwässer eignet, da der Ablauf jedoch zweimal hintereinander stattfindet ist eine ausreichende Berücksichtigung des Abwassers zu erwarten.

Spinnerei

Für das Spinnen von 1 kg Schussfaden (1a. Spinning (Werft)) werden 1,137 kg Biobaumwolle benötigt, die von dem vorgelagerten Prozess „GLO: Cotton Fiber (organic) (ginned at gate) Textile Exchange“ zugeführt wird. Die Energie von 1,94 kWh für

²⁴⁴ Vgl. Uyak, V./ et. al. (2007), S. 1; Karakoçak, B./ et. al. (2013), S. 1.139.

²⁴⁵ Vgl. Onder, N. S. (2020), Mail vom 03.01.20.

den Verarbeitungsschritt stammt aus dem zuvor beschriebenen produktionseigenen Heizkraftwerk. Als Abfall fallen 12 % des Inputs, also 0,137 kg Biobaumwolle an.²⁴⁶ Der Vorgang für die Produktion des Kettgarns (1b: Production Warp Yarn) wird wie beim Schussgarn modelliert. Dabei wird die gleiche Menge Biobaumwolle als Input verwendet, wobei 1,81 kWh Elektrizität verbraucht werden. Der Output beträgt auch hier 1 kg Kettgarn, bei einem Verlust von 12 %.²⁴⁷

Webereivorbereitung

Die Schritte der Weberei-Vorbereitung betreffen ausschließlich das Kettgarn. Zur Erstellung der Fadenschar (2a. Ball warping) werden 0,0004 kWh Energie aus dem Co-generation-Prozess und 0,358 kg des Kettgarns benötigt, um 1 m bzw. 0,354 kg aufgewickelter Rohgarn zu erhalten. Der entstehende textile Abfall von 4 g fällt in Form von feinem Faserstaub an, welcher als Partikel in die Luft abgegeben, gesammelt und anschließend als Abfall entsorgt wird.²⁴⁸

Um als Output 1 m gefärbtes Kettgarn zu erhalten (2b. Rope dyeing), werden 1,02 m Rohgarn aus dem vorangegangenen Prozess, 0,043 kWh Energie und 1,04 kg Dampf aus der Heizkraftanlage sowie 6,93 l Leitungswasser und diverse Chemikalien benötigt. Während des Färbeprozesses entstehen außerdem 0,02 m Abfall und 6,44 l Abwasser.²⁴⁹

Vorgehen bei der Modellierung von Chemikalien	
V1	Ist ein Datensatz vorhanden, der die verwendete Chemikalie abbildet?
V2	Ist ein Datensatz vorhanden, der eine ähnliche Chemikalie abbildet? (hinsichtlich funktioneller Gruppen, Molekülstruktur, etc.)
V3	Ist ein Datensatz für eine Chemikalie vorhanden, die auf ähnlichem Weg produziert wird oder aus einem ähnlichen Grundstoff stammt?
V4	Eigene Modellierung der Synthese auf Basis von Patent-, Industrie- und/ oder Herstellerangaben.
V5	Eigene Modellierung der Synthese auf Basis von Stöchiometrie und Thermodynamik, anhand von Literaturangaben und dem PSE, bei geringerem Informationsumfang als in 4.
V6	Falls nicht genügend der oben genannten Informationen zugänglich sind oder Basischemikalien zur Herstellung ebenfalls nicht in der Gabi-Datenbank gelistet sind, kann auf Datensätze anderer frei zugänglicher Datenbanken zurückgegriffen werden.
V7	Ansonsten Recherche nach einer anderen Chemikalie, die die gleiche Funktion erfüllt.

Abb. 12: Vorgehen bei der Modellierung von Chemikalien, Quelle: eigene Darstellung.

Zur Abbildung der eingesetzten Chemikalien werden möglichst passende Datenbankprozesse ausgewählt, die dem jeweiligen Produkt in der Synthese oder dem Grundstoff ähneln. Sind keine vergleichbaren Datensätze vorhanden werden die

²⁴⁶ Vgl. Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 530; Onder, N. S. (2020), Mail vom 30.01.20; Orta Anadolu Tic. ve San. İřl. A.ř. (2020). Siehe hierzu Abschnitt *Recycling innerhalb der Gewebeproduktion*.

²⁴⁷ Vgl. Orta Anadolu Tic. ve San. İřl. A.ř. (2020). Siehe hierzu Abschnitt *Recycling innerhalb der Gewebeproduktion*.

²⁴⁸ Vgl. Onder, N. S. (2020), Mail vom 30.01.20; Orta Anadolu Tic. ve San. İřl. A.ř. (2020). Siehe hierzu Abschnitt *Recycling innerhalb der Gewebeproduktion*.

²⁴⁹ Vgl. Onder, N. S. (2020), Mail vom 30.01.20; Orta Anadolu Tic. ve San. İřl. A.ř. (2020).

Prozesse anhand von Patenten, Industrieangaben, der Stöchiometrie und den Grundsätzen der Thermodynamik abgeschätzt. Die grobe hierarchisch geordnete Vorgehensweise bei der Modellierung von Chemikalien ist in Abb. 12 aufgeführt. Die in der Färberei verwendeten Chemikalien sind in Abb. 13 mit der entsprechenden Masse, deren prozentualen Anteil am Prozess-Output sowie der Art der Modellierung in Bezug auf die vorherige Abbildung dargestellt.

Chemikalien Färberei			
Bezeichnung	Masse in kg	% an Gewicht Prozess-Output	Modellierung
Indigo powder	0,013	3,67	V4/V5: Eigene Modellierung auf Basis der Heumann-Stecker-Synthese, auf Basis von Stöchiometrie und Thermodynamik. (Siehe Excel Tabelle „Prozessübersicht“ Blatt „Anhang Indigo“).
Sulfur black dyestuff	0,005	1,41	V5: Eigene Modellierung auf Basis von Informationen des „Ministry of Micro, Small & Medium Enterprises“ der indischen Regierung über den Business Case der Produktion von Sulphur Black.
Organic wetting agent (Alcohols C12-18, ethoxylated)	0,003	0,85	V1: Unterhalb des Abschneidekriteriums von 1%. Jedoch darstellbar durch: „EU-28: C16-18 fatty alcohol from palm oil (No.13-Matrix) ERASM“ (Siehe Excel Tabelle „Prozessübersicht“ Blatt „Anhang Sulphur Black“).
HydroBlue BASF (Sodium dithionite)	0,019	5,37	V4/5: Eigene Modellierung auf Basis von Voelkl, E./ et. al. (1997) US Patent 4017593 und Thermodynamik. (Siehe Excel Tabelle „Prozessübersicht“ Blatt „Anhang Sodium Dithionite“).
Caustic Soda	0,016	4,52	V1: Passender GaBi Datenbankprozess: "EU-28: Sodium hydroxide (caustic soda) mix (100%)".
Wetting agent (Phosphoric acid ester solution)	0,001	0,28	V5: Unterhalb des Abschneidekriteriums von 1%. Trotzdem abgeschätzt durch das stöchiometrische Verhältnis der Veresterung von Phosphorsäure und Ethanol zu Phosphorsäureester und Wasser. Mit zusätzlichem Wasser zu einer 10% Lösung verdünnt. Siehe Excel Tabelle „Prozessübersicht“ Blatt „Anhang Phosphoric acid ester“.
Stabilizer (Aqueous preparation of Sodium polyacrylate)	0,001	0,28	V2: Unterhalb des Abschneidekriteriums von 1%. Jedoch darstellbar durch: „EU-28: 2-Ethylhexyl Acrylate EBAM“ (siehe Excel Tabelle „Prozessübersicht“ Blatt „Prozessübersicht“).
Reducing agent (Crystallized glucose with one molecule water of crystallization)	0,006	1,69	V6: Übertragung des Probas Datenbankprozesses „Fabrik-Kartoffelstärke-DE-2010“ in GaBi: „DE: Potato Starch Probas“.

Abb. 13: In der Färberei eingesetzte Chemikalien und deren Modellierung, Quelle: eigene Darstellung.

Anhand der Tabelle wird deutlich, dass die Substanzen „Organic Wetting Agent“, „Wetting agent“ und „Stabilizer“ unterhalb des Abschneidekriteriums von 1 % der Masse liegen.²⁵⁰ Da sie zudem in Summe die Grenze von 5 % des Zieloutputs nicht überschreiten, dürfen diese in der Modellierung ausgeklammert werden.²⁵¹ Da für die Chemikalien jedoch vergleichbare Datenbankprozesse vorliegen bzw. deren Synthese mit wenig Aufwand abgeschätzt werden kann, sind sie aus Gründen der Vollständigkeit demnach einbezogen.²⁵²

²⁵⁰ In Tabelle rot umrahmt.

²⁵¹ Vgl. Kapitel 5.1.4 *Abschneidekriterien*.

²⁵² Siehe Abb. 13.

Um die Abschätzung jener Chemikalien ohne verwandten Datenbankprozess (V4/V5) näher zu erläutern, wird im Folgenden beispielhaft die Modellierung des Indigo Farbstoffs detailliert beschrieben. Die Herangehensweise und Berechnung erfolgt bei den anderen betroffenen Chemikalien ohne verfügbaren Datenbankprozess, die nach Vorgehen vier bzw. fünf modelliert werden, nach den gleichen Prinzipien.

Die Modellierung des Indigo-Farbstoffes erfolgt in engem Austausch mit dem Hersteller Dystar über die Reaktionsgleichungen der schrittweisen Synthese, aus denen jeweils über das stöchiometrische Verhältnis die Stoffmassen berechnet wurden.²⁵³ Um diese Informationen zu vervollständigen wird zudem die Änderung der Wärmeenergie berechnet, die benötigt wird, um die jeweiligen Lösungen zur Reaktionstemperatur zu erhitzen. Im ersten Schritt, der Strecker-Synthese, reagieren 93,13 g Anilin, 30,04 g Formaldehyd und 27,03 g Cyanwasserstoff, unter einer Energiezugabe von 24,4 MJ zu 132 g Phenylglycinnitril (PGN) und zu 18 g Wasser. Zudem werden bei einer Konzentration von 1% 17,21 l Wasser als Lösemittel benötigt, welches durch den Prozess geschleust wird und anschließend einer Abwasserbehandlung zugeführt wird. Der Energiebedarf wird über die Masse des Lösemittels (m (kg)), die spezifische Wärmekapazität des Lösemittels (c (J/kg*K)) und die Temperaturänderung während der Reaktion (ΔT (K)) berechnet (siehe Abb. 14).²⁵⁴

$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$	Beispiel: 1. Teil Strecker Synthese
m: Masse in kg	m: Summe der Masse der Edukte * 100
c: spezifische Wärmekapazität in J/kg*K	c: von Wasser = 4190 J
ΔT : Temperaturänderung in K	ΔT : 338,15 K
ΔQ : Änderung der Wärmeenergie in J	ΔQ : 24,4 MJ

Abb. 14: Berechnungsgrundlage der Änderung der Wärmeenergie, Quelle: eigene Darstellung, in Anlehnung an Doering, E./ et. al. (2012), S. 30 f.

Für den beschriebenen ersten Teil der Strecker-Synthese bedeutet dies: $\Delta Q = 17,22 \text{ kg} \cdot 4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \cdot 338,15 \text{ K} = 24,4 \text{ MJ}$. Der Energieinput, welcher für die im folgenden beschriebenen weiteren Synthesen und die Modellierung anderer Chemikalien benötigt wird, beruht ebenfalls auf dieser Berechnungsgrundlage. Die eingesetzten Basischemikalien werden jeweils durch Datenbankprozesse modelliert und können im Anhang eingesehen werden.²⁵⁵

Im zweiten Schritt der Strecker-Synthese werden 132 g des PGN mit Kalium-/ Natriumhydroxid und Wasser zusammengeführt. Zur Vereinfachung erfolgt die Modellierung mit 40 g Natriumhydroxid und 18 g Wasser sowie einem Energieinput von 5,01 MJ. Die 4,16 l Lösungsmittel Wasser werden wie im vorherigen Prozess gehandhabt. Im Zuge dessen entstehen 159 g Phenylglycin und 17 g Ammoniak, der als Gas aufsteigt. Zur

²⁵³ Vgl. Schmidt, A. J. (2020).

²⁵⁴ Vgl. Doering, E./ et. al. (2012), S. 30 f.

²⁵⁵ Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Indigo“.

Herstellung von 39 g Natriumamid werden 23 g Natrium und 17 g Ammoniak sowie 0,02 MJ Energie benötigt. Anschließend werden aus 159 g Phenylglycin und 39 g Natriumamid unter einem Energieinput von 17,59 MJ, 177 g Natrium-Indoxylat, 342 g Ammoniak und 40 g Natriumhydroxid erzeugt. Dabei werden 19,8 kg Kalium-/Natrium-Schmelze als Reaktionsmedium benötigt, welche anschließend aufbereitet und zu einer angenommenen Quote von 80% wiederverwendet wird. Die Co-Produkte Ammoniak und Natriumhydroxid werden in die Synthese von Natriumamid zurückgeführt, um dort so deren Produktion auszugleichen. In der folgenden Indigo-Synthese reagieren 354 g des Natrium-Indoxylats mit 36 g Wasser und 32 g Sauerstoff. Bei einem Energieinput von 0,24 MJ werden 262,27 g des Indigofarbstoffs erzeugt. Das dabei anfallende Natriumhydroxid wird in die Natriumamid-Herstellung zurückgeführt. Die 422 g Wasser als Lösungsmittel werden wie zuvor beschrieben durch den Prozess geschleust und einer Kläranlage zugeführt. Alle der beschriebenen benötigten Energiebeträge werden mit dem chinesischen Strommix „CN: Electricity grid mis ts“ abgebildet, da die Produktion des Indigos in Hongkong stattfindet. Die verwendeten Datensätze für die Abbildung der Basischemikalien können dem Anhang entnommen werden.²⁵⁶

Für die Synthese des eingesetzten Schwefelfarbstoffs „Sulphur Black“ erfolgt die Modellierung nicht wie beim Indigo auf Basis der Stöchiometrie, da die genaue Struktur- und Summenformel des Moleküls unbekannt bzw. umstritten sind.²⁵⁷ Stattdessen werden Informationen des „Small Industries Service Institute“ des indischen Ministeriums für „Micro, Small & Medium Enterprises“ verwendet, die den monatlichen Energie-, Wasser- und Chemikalienverbrauch einer Produktionsanlage für Schwefelschwarz auflisten. Demnach werden für die Herstellung des Farbstoffs, neben Wasser und Energie, Dinitrochlorobenzol, Natriumhydroxid, Schwefel, Natriumsulfid und Kesselkohle benötigt.²⁵⁸ Die entsprechenden Mengen und die verwendeten Datensätze können dem Anhang entnommen werden.²⁵⁹

Die Modellierung von Natriumdithionit beruht ebenfalls auf den hinterlegten Basischemikalien der GaBi-Datenbank. Die Massenverhältnisse der Inputs und Outputs werden aus einem Patent entnommen. Dabei wurde jene Vorgehensweise ausgewählt, welche die höchste Reinheit bei gleichzeitig höchstem Ertrag erzielt, da diese aufgrund dessen als wirtschaftlichste Option bewertet wird. Die Abschätzung des Energiebedarfs erfolgt wie gehabt über die Berechnung der Änderung der Wärmeenergie.²⁶⁰

²⁵⁶ Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Indigo“.

²⁵⁷ Vgl. Nagl, G. (2000), S. 124; Hunger, K. (2003), S. 216.

²⁵⁸ Vgl. Small Industries Service Institute (2003), S. 118 f.

²⁵⁹ Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Sulfur Black“.

²⁶⁰ Vgl. Voelkl et. al. (1997), S. 2 f. Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Sodium Dithionite“.

Für das verwendete Reduktionsmittel aus Glucose ist kein ähnlicher Datensatz verfügbar. Für Stärke, aus der Glucose industriell gewonnen wird, fehlt ebenfalls ein Datenbankprozess in den verwendeten GaBi-Datenbanken.²⁶¹ Daher werden Informationen über die Umweltauswirkungen von 1 kg Stärke aus der externen Datenbank „Probas“ des Umweltbundesamtes in einen neu erstellten Prozess übertragen.

Nach dem Färbvorgang werden 1,01 m des gefärbten Garns mit Hilfe des Long-Chain-Beamers für die Weberei aufgewickelt. Dabei werden 0,0005 kWh Energie benötigt. Zudem entstehen 0,01 m Abfall, sodass 1 m aufgewickeltes gefärbtes Garn entsteht.

Zum Schutz des Kettgarns auf dem Webstuhl wird Schlichte zusammen mit anderen Chemikalien auf das Garn aufgetragen. Als Hilfsmittel werden dabei Polyacrylsäure Co-Polymere, Natrium-Carboxymethylcellulose und Kartoffelstärke verwendet. Die Kartoffelstärke liegt zwar unterhalb des Abschneidekriteriums von 1 %, wurde aber in der Färberei bereits benötigt, steht daher als Datensatz zur Verfügung und wird entsprechend im Modell berücksichtigt. Zur Modellierung der Polyacrylsäure Co-Polymere wird unter verschiedenen Acrylat-Monomeren „EU-28: 2-Ethylhexyl-Acylate“ gewählt, da dieser Prozess im Vergleich die höchsten Umweltauswirkungen zeigt und so eine Unterschätzung vermieden wird. Die Natrium-Carboxymethylcellulose wird über den Datenbankprozess „EU-25: Graphic paper Eurograph/ ELCD“ abgebildet, der zuvor modifiziert wurde, sodass die gesamten Umweltauswirkungen auf das Hauptprodukt entfallen. Diese Modifikation basiert auf der Annahme, dass die Natrium-Carboxymethylcellulose aufgrund mehrerer Verarbeitungsstufen eine vergleichsweise hohe Umweltwirkung erzeugt.²⁶² Zusätzlich werden für das Auftragen der Schlichte 0,002 kWh Strom, 0,31 kg Dampf und 0,3 l Wasser benötigt. Die Abwasserbehandlung von 0,063 l erfolgt in den beschriebenen zwei Stufen.

Weberei

Um den behandelten Kettfaden und den unbehandelten Schussfaden zu einer textilen Fläche zu weben, werden je Meter Denim 0,224 kg Schuss- und 0,385 kg Kettgarn, sowie 0,504 kWh Strom benötigt. Der dabei entstehende Abfall von 0,014 kg wird einem externen Recyclingunternehmen zugeführt. Anschließend wird das Gewebe gekrumpft, um einem späteren Einlaufen vorzubeugen. Die hierfür eingesetzten Hilfsmittel liegen alle unterhalb der Abschneidegrenze von jeweils 1 % und insgesamt 5 % der Outputmasse. Da hierzu jedoch Datensätze verfügbar sind fließen die Chemikalien mit in das Modell ein. Der „Wetting Agent“ und der „Softening agent“ werden durch den bereits verwendeten Prozess „EU-28: C16-18 fatty alcohol from palm oil (No.13-Matrix) ERASM“ dargestellt, da Ersterer aus einer Mischung von C9-11 und C12-14 Alkoholen

²⁶¹ Vgl. Gooch, J. W. (2007), S. 170.

²⁶² Vgl. Dearborn, R. J. (1968), S. 2.

besteht und sich Letzterer aus pflanzlichen Stearaten zusammensetzt, die das Salz der Stearinsäure (C18) bilden.²⁶³ Die „Polyethylene emulsion“ wird gemäß Herstellerangaben zu 40 % aus „Polyethylene, HDPE, granulate“ und zu 60 % aus „EU-28: Water (deionised) ts“ modelliert.²⁶⁴ Da die verwendete Zitronensäure nicht in der Datenbank verfügbar ist, wird als ebenfalls schwache organische Säure alternativ „Acetic acid from methanol (low pressure carbonylation) (Monsanto process) ts“ verwendet.²⁶⁵ Zwar handelt es sich dabei um eher grobe Abschätzungen, da die Alternative jedoch einen Ausschluss in der Berücksichtigung bedeuten würde, wurde die Option vorgezogen.

Um nach dem Krumpfen 1 m Denim zu erhalten, werden 1,16 m Gewebe in den Prozess eingeführt, um den Längenverlust von 14,2 % auszugleichen. Zusätzlich werden 0,055 kWh Strom, 0,017 m³ Gas, 0,83 kg Dampf und 3,07 l Wasser verbraucht. Zur Qualitätskontrolle werden je Meter Denim 0,03 kWh Energie verbraucht. Die Verpackung von 1 m fertigen Denim-Gewebes mit 0,0037 kg Polyethylen-Folie wird durch den Datenbankprozess „RER: Polyethylene film (PE-LD)“ modelliert. Dabei werden 0,01 kWh Strom aus dem Heizkraftwerk benötigt.

Recycling innerhalb der Gewebeproduktion

Laut Angaben von ORTA werden die Garnabfälle des Spinnprozesses größtenteils in den eigenen Spinnprozess zurückgeführt. In die Luft abgegebener Faserstaub wird gefiltert und dem Abfall zugeführt.²⁶⁶ Für die Modellierung des Abfalls aus dem Spinnprozess wird angenommen, dass das Garn zunächst wieder zu Fasern zerkleinert werden muss, bevor es in den Spinnprozess zurückgeführt werden kann. Da hierzu keine Angabe des Herstellers vorliegt, wird zur Modellierung des Energieverbrauchs eine Literaturangabe von *Luiken, A./ Bouwhuis, G.* herangezogen, die für das Schreddern von Jeans 0,5 kWh Strom für 1 kg Material kalkuliert.²⁶⁷ Da diese Quelle von dem Zerkleinern von Hosen ausgeht, ist der Energieaufwand für das Garnrecycling in der Spinnerei vermutlich zu hoch angesetzt. Aufgrund mangelnder spezifischer Daten für das Recycling in der Spinnerei können diese Daten jedoch zur Abschätzung herangezogen werden. Die Verwertungsquote für den daraus konzipierten Recyclingprozess wird auf 88 % geschätzt. Diese Einschätzung beruht auf der Verlustrate der Spinnerei von 12 %. Der Anteil, der nicht recycelt werden kann, wird der kommunalen Müllverbrennung zugeführt, die für Textilien durch den erstellten Plan „EU-28: Textile waste incineration“ modelliert werden. Dieser setzt sich aus dem Datenbankprozess „EU-28:

²⁶³ Vgl. U.S. National Library of Medicine (o.J.i); U.S. National Library of Medicine (o.J.j).

²⁶⁴ Vgl. Fine Organics Industries Ltd. (o.J.); Rudolf GmbH (o.J.).

²⁶⁵ Vgl. U.S. National Library of Medicine (o.J.p); U.S. National Library of Medicine (o.J.q).

²⁶⁶ Vgl. Onder, N. S. (2020), Mail vom 30.01.2020 und 03.02.2020.

²⁶⁷ Vgl. Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 537.

Textiles in municipal waste incineration plant ts", zwei Energie Invertern und den primären Energiequellen „EU-28: Electricity grid mix ts" sowie „EU-28: Thermal Energy from natural gas ts" zusammen. Die Inverter erfüllen die gleiche Funktion wie bereits in der Modellierung der Energiegewinnung bei ORTA. Sie beinhalten einen gleichen Energiebetrag an positiven und negativen Werten als Input, sodass sich diese gegenseitig ausgleichen. Die bei der Müllverbrennung entstehenden Energien Elektrizität und Dampf gehen jeweils als positiver Betrag in die Inverter ein. Die entsprechenden primären Produktionsprozesse werden als negative Werte zugeführt und gleichen sich demnach rechnerisch aus (siehe Abb. 15). Die aufbereiteten Fasern werden direkt in den Spinnprozess zurückgeführt.

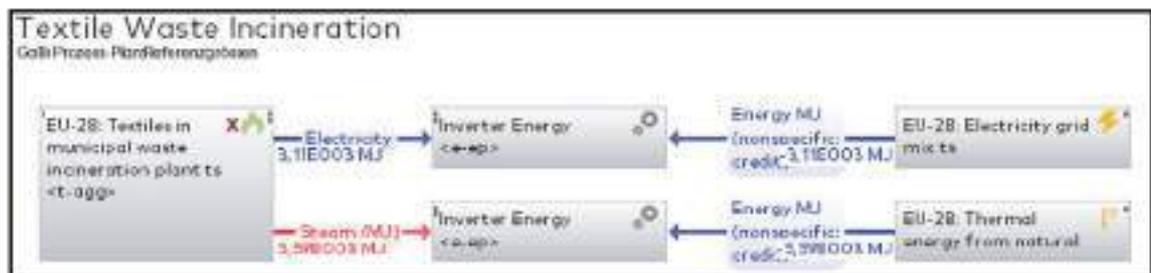


Abb. 15: Modellierung textile Müllverbrennung in GaBi, Quelle: eigene Modellierung.

Da während des Schärprozesses (Ball Warping) lediglich 1 % an Verlust entsteht und das Garn in dem Prozessschritt nur umgewickelt wird, ist anzunehmen, dass der Abfall in Form von Staub anfällt, welcher wiederum der zuvor beschriebenen textilen Müllverbrennung zugeführt wird. Für die übrigen Schritte der Webereivorbereitung wird der gleiche Recyclingvorgang wie bei der Spinnerei angenommen, da das Textil weiterhin als Garn vorliegt.

Die Abfälle aus der Weberei werden laut ORTA zu einem Recyclingunternehmen gebracht, welches je nach Größe kleine Produkte aus dem Denim fertigt oder das Gewebe schreddert und zu neuem Denim Garn verarbeitet.²⁶⁸ Die Modellierung erfolgt auf dem separaten Plan „EU-28: Recycling Weaving ORTA“. Die Transportdistanz wird auf 50 km per LKW geschätzt, da es sich anteilig um geringe Mengen Abfall von niedrigem Wert handelt, für die sich eine längere Anfahrt gegebenenfalls nicht rechnen würde. Die Modellierung des Transports erfolgt wie im Abschnitt *Transport LKW* beschrieben. Zur Abbildung des eigentlichen Recyclings werden Abfälle der Weberei zunächst zu jeweils 50 % aufgeteilt. Die Hälfte des Gewebes, welches zu kleinen Produkten weiterverarbeitet wird, verlässt das Produktsystem lastenfrei.²⁶⁹ Um die Kohlenstoffbilanz nicht zu verfälschen wird ein Ausgleich vorgenommen, indem für den Input des in der Baumwolle enthaltenen Kohlenstoffs als Output CO₂-Emissionen modelliert werden. Da Baumwolle zu fast 100 % aus Cellulose besteht und diese sich wiederum

²⁶⁸ Vgl. Onder, N. S. (2020), Mail vom 30.01.2020.

²⁶⁹ Vgl. Onder, N. S. (2020), Mail vom 03.02.2020.

aus Glucose Molekülen zusammengesetzt, wird die Menge an CO₂ durch die stöchiometrische Modellierung der Verbrennung von Glucose und des entsprechenden Molekulargewichts berechnet: $C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O$.²⁷⁰ Daraus folgt aus der Verbrennung von 180 g Glucose die Entstehung von 264 g CO₂.²⁷¹ Für die Modellierung der anderen Hälfte des Gewebeabfalls, die zu neuem Jeansgarn verarbeitet wird, erfolgt der gleiche Vorgang des Schredderns, wie auch für die Spinnerei beschrieben. Um die Modellierung zu vereinfachen, werden die entstehenden Fasern in den Spinnprozess bei ORTA zurückgeführt, um dort Primärfasern zu ersetzen.

Transportstrecke Türkei-Tunesien

Das verpackte Denim-Gewebe wird anschließend per LKW zum nächstgelegenen Hafen ins 315 km entfernte Mersin gebracht. Der Weitertransport nach Tunis erfolgt per Containerschiff über eine Distanz von 2.251 km. Von Tunis aus wird das Gewebe in das 60,6 km entfernte Ras Jebel zu Denim Authority transportiert, wo die weitere Verarbeitung erfolgt. Der LKW-Transport wird, wie im Abschnitt *Transporte LKW* beschrieben, modelliert.²⁷²

Transporte Schiff

Zur Abschätzung der Distanz der Schiffsrouten wird das Online-Tool „searates.com“ verwendet, das verschiedene Anbieter für Containerschiff-Transporte vergleicht. Die Modellierung des Transports erfolgt entsprechend der Distanz durch den Datenbankprozess „GLO: Container ship, 5.000 to 200.000 dwt payload capacity, ocean going“, dem Schweröl als Treibstoff zugeführt wird. Andere vorhandene Datensätze wurden aufgrund ihrer mangelnden technischen Übereinstimmung oder der Konzeption des Transports als Produkt ausgeschlossen.

Konfektion und Veredelung

Die Produktionsschritte Konfektion und Veredelung bei Denim Authority werden mit einem einzigen Prozess abgebildet, da sich die Informationen teilweise auf die gesamte Produktionsstätte beziehen und nicht alle Stoffströme eindeutig einem Produktionsschritt zugeordnet werden können. Sowohl der Wasserverbrauch, als auch der Output an Müll wird nur übergreifend für die gesamte Produktionsstätte erfasst. Die Allokation der global erfassten Inputs erfolgt über die Anzahl von 1.162.054 produzierten Teilen und wird mit den produktspezifischen Angaben kombiniert.²⁷³

²⁷⁰ Vgl. Gooch, J. W. (2007), S. 170; Baker, I. (2018), S. 51 f.

²⁷¹ Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang EoL“.

²⁷² Vgl. Google Maps (o.J.a); Google Maps (o.J.b); Searates (o.J.a).

²⁷³ Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Denim Authority“.

Für die Montage einer MAIRAA Jeans werden 1,044 m bzw. 724,54 g des zuvor beschriebenen Denim-Gewebes von ORTA Anadolu benötigt, welches mit einem Verlust von 14 % zugeschnitten wird. Die benötigten 0,097 m bzw. 27,06 g Taschenfutter aus 100 % Biobaumwolle werden ebenfalls zugeschnitten, sodass weitere 3 g Verschnitt anfallen. Die Abschätzung des Futterstoffs erfolgt anhand eines modifizierten Modells des ORTA Gewebes, bei dem die Färberei herausgenommen wird, da der Futterstoff ungefärbt ist. Der entstehende Prozess „TR: Lining 100 % organic cotton“ wird ebenfalls für die Darstellung des Joker Tags verwendet, sodass der Gesamtinput 32,4 g beträgt.

Der Reißverschluss der Firma YKK besteht aus 7,55 g Messing sowie 1,22 g recyceltem Polyester und wird anteilig durch die Datenbankprozesse „DE: Red brass part (EN15804 A1-A3) ts“ und „EU-28: Polyethylene terephthalate fibers (PET) ts“ abgebildet. Die Polyesterfasern werden an dieser Stelle nicht durch einen zusätzlichen Webprozess weiterverarbeitet, da die modellierten Fasern, im Gegensatz zum tatsächlichen Produkt, aus primärem Polyester bestehen. Diese Überschätzung des Materials wird durch den ausgelassenen Webprozess kompensiert. Dies gilt ebenfalls für die Modellierung des Care Labels.

Die einzelnen zugeschnittenen Teile werden anschließend mit Hilfe von 344 m Polyesterfaden zusammengenäht. Dies entspricht bei einer angenommenen Masse von 600 dtex²⁷⁴ einem Gewicht von 20,64 g, welches durch den Datensatz „EU-28: Polyethylene terephthalate fibres (PET) ts“ dargestellt wird.²⁷⁵ Da sowohl das Care Label, als auch die finale Verpackung aus recyceltem Polyester bestehen, werden diese ebenfalls mit dem Prozess abgebildet, sodass in Summe 34,01 g PET in das Modell mit einfließen. Der Knopf und die vier benötigten Nieten wiegen insgesamt 7,42 g und sind als eigener Plan konzipiert. Dieser enthält den Datenbankprozess „GLO: Punching steel sheet small part ts“, der vorgeschchnittene Stahlplatten zwischen zwei geformte Bauteile presst, um der Stahlkomponente die gewünschte Form zu geben. Dem Stanz-Vorgang wird „EU-28: Stainless steel cold rolled coil (430) Eurofer“ als Rohstoff zugeführt, da kaltgerollter Stahl im Stanz-Prozess vorgesehen ist, diese Stahlsorte (430) zusammen mit Nummer 304 von YKK verwendet wird und im direkten Vergleich mit geringem Abstand die höheren Umweltlasten verursacht.²⁷⁶ Für die Modellierung der benötigten Schmierstoffe und der Elektrizität werden die jeweiligen Datensätze aus Deutschland verwendet, da YKK hier produziert. Der entstehende Stahlschrott wird durch den Inverterprozess "EU-15: No. 3 steel (unprepared bushling)- scrap credit (open loop) ts" in Verbindung mit dem Prozess des Rohmaterials anteilig gutgeschrieben. Unter den Recyclingprozessen wurde No. 3 gewählt, da dieser Ausschritte und Materialgerippe in

²⁷⁴ Dtex= Dezitex, Einheit für Garnstärke, 1dtex= 1 g/10.000 m Faden.

²⁷⁵ Vgl. Gütermann (o.J.).

²⁷⁶ Vgl. Piorko, L. (2020), Mail vom 17.02.2020.

einer Dicke von weniger als 0,3 cm beschreibt. Hierbei werden für 1 kg Schrott, 0,4 kg Neuware gutgeschrieben, sodass die veränderte Qualität über die Masse berücksichtigt wird. Dieses Verhältnis ist einstellbar, wird aufgrund fehlender Zusatzinformationen jedoch beibehalten.

Das Hauptlabel mit dem AA Aufdruck sowie das Größenlabel werden mit einer weiteren Modifikation des Datensatzes des ORTA Gewebes modelliert. Der Färbeprozess wird erneut herausgelöst und der Faserinput erfolgt entsprechend der Fasermischung von 70 % Biobaumwolle und 30 % recyceltem Polyester. Für den Polyesteranteil wird erneut der Prozess „EU-28: Polyethylene terephthalate fibres (PET) ts“ herangezogen.

Das Hangtag und die Sticker auf der Verpackung bestehen größtenteils aus recyceltem Papier bzw. Pappe. Hierfür wird der Prozess für Pappkarton „US: Containerboard ts/ AF & PA“ herangezogen, da dieser das Produkt passend abbildet und vergleichsweise niedrigere Umweltbelastung vorweist als „EU-25: Graphic Paper Euro-graph/ ELCD“. Dieser Datensatz wird wiederum zur Modellierung des Jacrons genutzt, bei dem angenommen wird, dass hiermit höhere ökologische Auswirkungen einhergehen, da neben Cellulose auch Latex zur Herstellung verwendet wird. Hierzu wurde der genannte Datenbankprozess, wie schon zur Modellierung der Natrium Carboxyl-Methyl-Cellulose in der Webereivorbereitung (2d: Sizing), abgeändert, indem die weiteren Produktoutputs herausgenommen wurden, sodass alle Umweltlasten auf das Papier entfallen.

Um bei der Veredelung den gewünschten Farb- und Faserabrieb zu erzeugen, werden verschiedene Trocken- und Nassprozesse durchgeführt, bei denen Bimssteine und diverse Chemikalien benötigt werden.

Die 2,15 kg Bimsstein werden durch den Prozess „EU-28: Washing pumice (EN15804 A1-A3) ts“ abgebildet. Die Chemikalien stammen größtenteils von dem italienischen Unternehmen Nearchimica S.p.A. und werden anhand der angegebenen Inhaltsstoffe der Material-Sicherheitsdatenblätter (MSDS) nachmodelliert. Fehlen hierfür Basischemikalien in der Datenbank, werden diese anhand von Patentangaben abgeschätzt.²⁷⁷ Die jeweiligen Zusammensetzungen und die dazugehörigen Datensätze sind Abb. 16 gelistet und erläutert.

²⁷⁷ Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Etidronic Acid“, „Anhang Sodium Persulfates“.

Chemikalien Veredelung			
Bezeichnung	Masse in g	% an Gewicht Prozess-Output	Modellierung
NEARSTONE NGTS	2,85	0,43	Besteht aus Cellulase, einem Enzym, das Bindungen der Cellulose aufbricht und diese damit schrittweise abbaut. Cellulase wird aus Schimmelpilzkulturen gewonnen. Weder Cellulase noch anderes Enzym in Datenbank verfügbar. Schimmelpilze auch nicht. Daher kaum darstellbar, fällt aber ohnehin unter das Abschneidekriterium von 1% und wird daher weggelassen. ¹
NEARBLEACH E- CLOUD	83	12,39	V4: eigene Modellierung aus 6% Etidronic Acid (siehe "Anhang Etidronic Acid"), 4% Hydrogen peroxide "DE: Hydrogen peroxide (100%; H2O2) (Hydrogen from steam cracker) ts", Annahme Rest ist Wasser ("EU-28: Water (deionised) ts"). ²
KATALIN SKY WHITE	29	4,33	V4: eigene Modellierung, >90% Natriumpersulfat, dieses wiederum modelliert nach Patent US2.899.272, siehe "Anhang Sodium Persulfate". ³
NEARBLEACH SKY WHITE	83	12,39	V4: eigene Modellierung aus 4% Etidronic Acid (siehe "Anhang Etidronic Acid"), 3,75% Essigsäure ("DE: Acetic acid from methanol (low pressure carbonylation)(Monsanto process) ts", Annahme Rest ist Wasser ("EU-28: Water (deionised) ts"). ⁴
NEARCAND NCP	25	3,73	V4: eigene Modellierung aus 70% Natriumcarbonat ("EU-28: Soda (Na2CO3) ts") und 30% Natriumpercarbonat ("Sodium percarbonate" (siehe Laundry detergent)). ⁵
NEARCAND OP EXTRA	10	1,49	V4: eigene Modellierung aus 75% Natriumcarbonat ("EU-28: Soda (Na2CO3) ts"), 9,5% Reaktionsprodukt aus "Benzolsulfonic acid, 4-C10-13-sec-alkyl derivs. and Benzenesulfonic acid, 4-methyl- and sodium hydroxide" ("EU-28: C10-13 Linear alkybenzene sulphonic acid (HLAS)(petro based)(No. 2-Matrix) ERASM"), 6% Natriumpercarbonat ("Sodium percarbonate" (siehe Laundry detergent)), 4% Dinatrium metasilicat ("EU-28: Calcium silicate ts") und "2-(2-butoxyethoxy) ethanol; diethylene glycol monobutyl ether" ("EU-28: Diethylene glycol PlasticsEurope"). ⁶
NEARISERVE DSW	10	1,49	V4: MSDS gibt keine Infos über Inhaltsstoffe, laut Hedman bzw. Nellström: Polycarboxylates/ Soaping agent (Acrylic Polymer), laut GaBi Extension database textile: Soaping agent (sodium alkyl-benzenesulphonate) oder Soaping agent (phosphonic acid and foam stabilizers), daher "EU-28: C10-13 Linear alkybenzene sulphonic acid (HLAS)(petro based) (No. 2-Matrix) ERASM". ⁷
NOVASOFT	21	3,14	V4: eigene Modellierung nach Inhaltsstoffen: 17,5% Di(Tallowamidoethyl)hydroxyethylmethylammoniummethylsulfate, 2% Isopropanol ("DE: Isopropanol ts") und 460ppm Potassium hydroxide ("EU-28: Sodium hydroxide (caustic soda) mix (100%) ts"). Di(Tallowamidoethyl)hydroxyethylmethylammoniummethylsulfate = Amidoamin (Nordland-Chemie). Werden aus aliphatischen Polyaminen ("DE: Hexamethylenediamine (HMDA; via adipic acid) ts") und Fettsäuren ("EU-28: C16-18 fatty alcohol from palm oil (No. 13-Matrix) ERASM") hergestellt. Verhältnis unklar, Annahme 50/50 und Sensitivitätsanalyse. Annahme Rest Methanol. ⁸

Abb. 16: In der Veredelung eingesetzte Chemikalien, Quelle: eigene Darstellung, in Anlehnung an:
¹ Vgl. Alrksson, B./ et.al. (2009), S. 2366; Ellilä, S./ et.al. (2017), S.1; Nearchimica S.p.A.(2018a), S. 2; Denim Authority (2020d);
² Vgl. Pandey, S. C./ et.al. (2011), S.11; Nearchimica S.p.A. (2018b), S. 2;Denim Authority (2020d).
³ Vgl. Flach, D./ Garver, R. (1959), S. 4; Nearchimica S.p.A. (2019a), S.2 f.; Denim Authority (2020d).
⁴ Vgl. Pandey, S. C./ et.al. (2011), S.11; Nearchimica S.p.A. (2019b), S. 2 f.; Denim Authority (2020d).
⁵ Vgl. Nearchimica (S.p.A. 2019c), S. 2; Denim Authority (2020d).
⁶ Vgl. Denim Authority (2020d); Nearchimica S.p.A. (2020a), S.2.
⁷ Vgl. Nearchimica (2015), S. 1; Hedman, E. (2018), S. 29; bzw. Nellström, M./ Saric, M. (2019), S. XIII; Denim Authority (2020d); thinkstep GmbH (o.J.d).
⁸ Vgl. Prochimica Novarese (2015),S.2; Denim Authority (2020d); Nordlandchemie (o.J.); Cargill, Incorporated. (o.J.) Epochemie International Pte Ltd (o.J.).

Neben den beschriebenen Materialien und Chemikalien werden bei der Konfektion und Veredelung einer MAIRAA Jeans 2,92 kWh Strom, 122,67 J Dampf und 177,12 l Wasser benötigt. Für die Modellierung des Strombedarfs liegt kein länderspezifischer Strommix vor. Dieser setzt sich laut Informationen der Internationalen Energieagentur (IEA) zu 95,76 % aus Gas, zu 2,18 % aus Windkraft, zu 0,65 % aus Photovoltaik, zu 0,21 % aus Öl, zu 0,08 % aus Wasserkraft und zu 1,13% aus anderen Quellen

zusammen.²⁷⁸ Die entsprechenden EU-28 bezogenen Datenbankprozesse werden kombiniert, um den tunesischen Strommix nachzubilden. Für die Dampferzeugung wird Gas als Energiequelle gewählt, da auch der Strommix hauptsächlich hieraus besteht.²⁷⁹ Da die Wasserversorgung in Tunesien hauptsächlich auf Grundwasser basiert, wird der Datensatz „EU-28: Tap water from groundwater ts“ als Input für den Wasserbedarf verwendet.²⁸⁰

Das entsprechende Abwasser von 52,04 l wird der kommunalen Kläranlage zugeführt, die durch den Datenbankprozess „EU-28: Municipal waste water treatment (mix) ts“ dargestellt wird. Da nicht bekannt ist, ob der Klärschlamm verbrannt oder als Düngemittel verwendet wird, wurde der technologische Mix beider Optionen zur Modellierung gewählt.

Neben dem bereits beschriebenen Gewebeverschnitt von insgesamt 104,68 g, entsteht bei der Nassveredelung ein zusätzlicher Faserverlust des Denimgewebes von 39,56 g. Diese Menge basiert auf einer Messung des Warengewichts des unbehandelten und veredelten Denims.²⁸¹ Unter Abzug des Gewebeverschnitts und Faserabriebs bleiben von der Angabe von Denim Authority 303,68 g Abfall je Produkt übrig. Der nicht näher beschriebene Abfall wird einer kommunalen Müllverbrennungsanlage zugeführt, die durch den erstellten Plan „EU-28: Municipal Waste Incineration“ dargestellt wird. Dieser wird ähnlich modelliert wie die bereits beschriebene textile Müllverbrennung. Dazu wird der Datenbankprozess „DE: Municipal waste in waste incineration plant ts“ mit Energie-Inverter-Prozessen verbunden, welche die Modellierung einer Gutschrift über die bei der Müllverbrennung entstehende Energie ermöglichen. Zu diesem Zweck besitzt der Inverter die gleiche Menge an Energie als positiven und negativen Betrag. Die Energie der Müllverbrennung geht als positiver Betrag ein und wird durch die Umweltwirkungen jener Prozesse gutgeschrieben, die sonst notwendig wären, um die Energie als Primärprodukt zu erzeugen, da deren Bereitstellung somit vermieden wird. Es wird angenommen, dass der Faserabrieb aus dem Wasser herausgefiltert und ebenfalls der Müllverbrennung zugeführt wird, die mit dem Plan „EU-28: Textile Waste incineration“ modelliert wird, der bereits im Abschnitt *Recycling in der Gewebeproduktion* beschrieben ist.

Bei der Modellierung der Verwertung des Gewebeverschnitts wird ein Faserrecycling unter Wertminderung angenommen (Downcycling), bei dem das Fasermaterial zu Dämmstoffen weiterverarbeitet wird. Hierzu müssen die Textilien zunächst geschreddert werden.²⁸² Für den Baumwollanteil wird zuerst, wie bei der Verwertung der We-

²⁷⁸ Vgl. International Energy Agency (2018), S. 2; International Energy Agency (2019).

²⁷⁹ Vgl. International Energy Agency (2019).

²⁸⁰ Vgl. Hamed, Y./ et. al (2018), S. 24.

²⁸¹ eigene Messung.

²⁸² Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 537. Siehe auch Schreddern bei *Recycling in der Gewebeproduktion*.

bereiabfälle, ein Ausgleich der Kohlenstoffbilanz durchgeführt. Anschließend wird das Fasermaterial, wie in der PEFCR eines T-Shirts empfohlen, durch den Prozess „EU-28: Glass wool ts“ gutgeschrieben. Glaswolle wird als Primärrohstoff für Dämmmaterialien genutzt, sodass der Einsatz der zurückgewonnenen Baumwollfasern deren Produktion verhindert. Da die PEFCR keine spezifischen Angaben zu einer Korrektur der Massenverhältnisse vorgibt, wird angenommen, dass die Stoffe die gleiche Isolationsleistung erbringen.²⁸³ Diese Annahme sollte in der Interpretation genauer betrachtet werden, da eine gegebenenfalls zu hohe Gutschrift in einer Unterschätzung der Umweltlasten resultieren könnte.

Transport Tunesien-Deutschland

Ist das Produkt fertiggestellt und verpackt, erfolgt der Transport zum Logistikzentrum in Aurach in Süddeutschland. Zunächst werden die Produkte mit dem LKW über eine Strecke von 60,6 km von Ras Jebel zum Hafen nach Tunis gebracht. Daraufhin erfolgt der nächste Transportabschnitt über eine Distanz von 912 km per Schiff von Tunis nach Genua. Abschließend erfolgt der LKW-Transport von Genua nach Aurach über 679 km.²⁸⁴ Die Modellierung erfolgt wie bereits in den Abschnitten *Transporte LKW* und *Transporte Schiff* beschrieben.

Distribution

Das Logistikzentrum des Unternehmens Loxxess schlägt im Jahr insgesamt 1.506.496 Bekleidungsstücke für AA um. Dabei werden anteilig für AA jährlich 136.222 kWh an Strom, 39,89 m³ Gas, 17.499 l Öl und 300.732 l Wasser benötigt.²⁸⁵ Die Stromversorgung erfolgt über 100 % Ökostrom, dessen genaue Zusammensetzung vom Stromanbieter nicht veröffentlicht wird.²⁸⁶ Daher wird ein gleichteiliger Strommix aus Photovoltaik, Wind- und Wasserkraft angenommen. Zur Modellierung werden die jeweiligen Datenbankprozesse für Deutschland kombiniert. Der Öl- und Gasbedarf wird mit den länderspezifischen Datensätzen „DE: Natural gas mix ts“ und „DE: Crude Oil mix ts“ abgedeckt. Der Wasserbedarf wird durch „EU-28: Tap water from groundwater ts“ abgebildet, da die Wasserversorgung in Bayern zu 92 % aus Grundwasser-Reserven erfolgt.²⁸⁷ Die Entsorgung des dabei entstehenden Abwassers erfolgt über den in der Datenbank hinterlegten Plan „DE: Municipal waste water treatment (variable sludge treatment) ts“. Da die Verwendung des Klärschlammes nicht bekannt ist, wird ein Verhältnis von je 50 % angenommen. Außerdem entstehen im Rahmen der Leistungen,

²⁸³ Vgl. Pesnel, S./ Payet, J. (2019), S. 92.

²⁸⁴ Vgl. Google Maps (o.J.b); Google Maps (o.J.c); Searates (o.J.b).

²⁸⁵ Vgl. Loxxess Neuburg GmbH & Co.KG (2020a). Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Loxxess“.

²⁸⁶ Vgl. Klimainvest Green Concepts GmbH (2019); Stadtwerke Lünen (2018).

²⁸⁷ Vgl. Wasserwirtschaftsamt Ansbach (2018).

die für AA erbracht werden, anteilig aus der Gesamtmenge berechnet, 95,26 t Papiermüll, 4,55 t Restmüll und 3,37 t Plastikmüll pro Jahr.²⁸⁸ Die verschiedenen Abfälle werden spezifischen Plänen der Müllverbrennung zugeführt. Der Restmüll geht in die bereits in der Modellierung verwendete „EU-28: Municipal Waste Incineration“. Für die Verbrennung des Plastik- und Papiermülls wird dieser Datensatz modifiziert, indem der Prozess „DE: Municipal waste in waste incineration plant ts“ jeweils durch „EU-28: Paper/ Cardboard in waste incineration plant ts“ und „DE: Plastic packaging in waste incineration plant ts“ ersetzt wird.

Beim Eingang von Bestellungen wird die Ware kommissioniert und in Versandkartons aus recyceltem Karton mit einem durchschnittlichen Inhalt von drei Artikeln, verpackt.²⁸⁹ Der Karton hat ein Eigengewicht von 270 g, sodass jährlich 502.165 Kartons mit einem Gewicht von insgesamt 135,58 t für den Versand von AA Teilen benötigt werden.²⁹⁰ Da kein deutscher oder europäischer Datensatz für Pappe verfügbar ist, wird der U.S. amerikanische Datenbankprozess „US: Containerboard ts/ AF&PA“ herangezogen.

Vertrieb

Um das Jeansprodukt umfassend abzubilden, werden die konzeptionellen und organisatorischen Tätigkeiten im AA Hauptsitz mit einbezogen. Dafür wird der Energiebedarf von 122.374,8 kWh, der Wärmebedarf von 398.343,6 kWh und der Wasserbedarf von 471.780 l aus den jeweiligen Jahresabrechnungen entnommen und in Bezug zu den 1.234.868 verkauften Produkten im Jahr gesetzt.²⁹¹ Die Energieversorgung erfolgt durch den Anbieter Greenpeace Energy. Dessen Strommix stammt zu 71,8 % aus Wasser- und zu 28,2 % aus Windenergie aus Österreich und Deutschland. Dementsprechend wird der Strombedarf des Hauptsitzes aus „DE: Electricity from wind power ts“ und „AT: Electricity from hydro power ts“ zusammengesetzt.²⁹² Das verwendete Wasser stammt aus einem Grundwasserreservoir der Kölner Bucht und wird entsprechend als „EU-28: Tap water from groundwater ts“ abgebildet, da kein deutschlandweiter Datensatz vorliegt.²⁹³ Die Wärmeversorgung erfolgt, gemäß der Abrechnung, über Fernwärme, die mit Hilfe des Datenbankprozesses „EU-28: District heat mix ts“ modelliert wird. Die 471.780 l Abwasser werden ebenfalls dem in der Datenbank hinterlegten Plan „DE: Municipal waste water treatment (variable sludge treatment) ts“

²⁸⁸ Vgl. Loxxess Neuburg GmbH & Co.KG (2020b).

²⁸⁹ Vgl. Dorow, L. (2020).

²⁹⁰ Eigene Messung des Gewichts und Hochrechnung über Gesamtanzahl.

²⁹¹ Vgl. PMCS Property Management Services GmbH (2018); Greenpeace Energy (2019); Rheinenergie (2019). Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Headquarter“.

²⁹² Vgl. Greenpeace Energy (2019); Greenpeace Energy (o.J).

²⁹³ Vgl. Rheinenergie (o.J).

zugeführt. Das Abfallaufkommen wird nicht separat erfasst, sodass hierfür eine Abschätzung, auf Basis des jährlichen Haushaltsabfalls pro Kopf in Deutschland im Verhältnis zu den Arbeitsstunden der Mitarbeiter, vorgenommen wird. Die Entsorgung der so errechneten 12.467 kg Abfall erfolgt über die „EU-28: Municipal Waste Incineration“.²⁹⁴

Da der Verkauf des Beispielprodukts über den Onlineshop stattfindet, werden dessen Auswirkungen anhand des Energieverbrauchs des Servers abgeschätzt. Laut Schätzung des Betreibers liegt dieser bei rund 768 kWh im Jahr. Diese Angabe steht in Relation zu 260.281 verkauften Artikeln über den Onlineshop pro Jahr.²⁹⁵ Der Strom für den Server stammt laut Angaben des Betreibers zu 100 % aus Ökostrom.²⁹⁶ Da die genaue Zusammensetzung unbekannt ist, wird ein Mix aus Photovoltaik-, Wasser- und Windenergie angenommen und mit entsprechenden Datensätzen modelliert.

Sieben Hin- und Rückflüge von Köln nach Tunesien, die ausschließlich im Zusammenhang mit der Produktgruppe Jeans durchgeführt werden, werden aus Gründen der Vollständigkeit ebenfalls berücksichtigt. Die entsprechenden Emissionen werden auf die Anzahl aller 78.565 verkauften Jeansprodukte umgelegt.²⁹⁷ Da keine Datenbankprozesse zur Modellierung von Personentransport im Luftverkehr verfügbar sind, wird auf die Kalkulation von Atmosfair zurückgegriffen. Demnach entstehen bei den entsprechenden Flügen 4.211 kg CO₂-Äquivalent.²⁹⁸ Bei Verwendung dieser Angabe muss berücksichtigt werden, dass ausschließlich Klimawirkungen durch Abschätzung des Strahlungsantriebs bilanziert werden. Dies beinhaltet die Berücksichtigung der erwärmenden Effekte von CO₂-Emissionen, der Ozonbildung aufgrund von Stickoxid-Emissionen, des Ausstoßes von Wasserdampf, der Absorption der Sonneneinstrahlung durch Rußpartikel, der Bildung von Kondensstreifen und die damit verbundenen Förderung bzw. Veränderung von Zirruswolken. Dem entgegengesetzt wirken die Verminderung von atmosphärischem Methan durch NO_x-Emissionen und die Reflexion von Sonneneinstrahlung durch Sulfataerosole.²⁹⁹ Vernachlässigt werden lokale Luftverschmutzung und Lärm sowie Flächennutzung, die Umweltwirkungen des Flugzeugbaus und indirekte Einflüsse auf Biodiversität, Wasser- und Bodenbelastung.³⁰⁰ Da die Umweltwirkungen aus Personentransport laut PCR nicht berücksichtigt werden und die Flugreisen nur aufgrund der aktuellen thematischen

²⁹⁴ Vgl. Statistisches Bundesamt (2019). 455 kg Haushaltsabfall/ Jahr/ Kopf in DE, von 365 Tagen/ Jahr 250 Arbeitstage, 8 h Arbeit pro Tag, 8 h zu Hause, 80 FTEs bei AA -> $455 * (1/365 * 250) / 2 * 80 = 12.467$ kg.

²⁹⁵ Vgl. Köneke, T. (2020), Mail vom 05.02.2020; Maier, A./ Warkentin, R. (2020), Mail vom 06.01.2020.

²⁹⁶ Vgl. Maier, A./ Warkentin, R. (2020), Mail vom 02.01.2020.

²⁹⁷ Vgl. Muth/ L. (2020); Köneke, T. (2020), Mail vom 05.02.2020.

²⁹⁸ Vgl. Atmosfair gGmbH (o.J.a).

²⁹⁹ Vgl. Umweltbundesamt (2012a), S. 1; Atmosfair gGmbH (o.J.b).

³⁰⁰ Vgl. Bopst, J./ et. al. (2019), S. 38, 42, 51 f.

Relevanz und zur Vollständigkeit hinzugerechnet werden, kann diese Abschätzung unter Berücksichtigung ihrer Limitation verwendet werden.³⁰¹

Transport zum Endkunden

Der Konsum des Produkts erfolgt in Deutschland, da dort der Hauptabsatzmarkt von AA liegt.³⁰² Es wird angenommen, dass der Gebrauch in Köln stattfindet, da hier das Headquarter von AA sitzt und die Distanz circa den Mittelwert im Vergleich zu Strecken in andere deutsche Großstädte einnimmt.³⁰³ Die Route wird per Google Maps abgeschätzt. Der Transport vom Lager zum Endkunden wird entsprechend der Fahrzeugflotte des Versandpartners DHL dargestellt. Diese besteht zu 71 % aus Transportern, 18 % Autos und 11 % LKWs. Die Emissionsklassen setzen sich dabei aus 12 % alternativen Antrieben, 23 % EURO 6, 47 % EURO 5 und 18 % EURO 4 zusammen.³⁰⁴ Dementsprechend wird das Transportgut zunächst anteilig auf die Fahrzeugtypen und dann auf die jeweiligen Emissionsklassen umgelegt, um anschließend auf umgekehrtem Wege wieder zu einer Einheit zusammengefügt zu werden.

Für die Modellierung des Anteils an Transport per Lieferwagen und LKW transformiert ein Converter-Prozess die in der Versandbox verpackte MAIRAA-Jeans nach Gewichtanteil zu 71 % zu Transportgut per Lieferwagen und zu 11 % zu Transportgut per LKW. Der jeweilige Gewichtanteil wird einem zweiten Converter zugeführt, der das Transportgut noch einmal entsprechend der Emissionsklassen aufteilt. Die alternativen Antriebe werden hierbei der EURO 6 Klasse zugerechnet, da für Transporter und LKWs keine entsprechenden Datensätze verfügbar sind. Außerdem fasst DHL unter der Klasse EURO 4 auch alle ökologisch schlechteren Fahrzeuge zusammen, sodass hierfür ein Ausgleich entsteht.³⁰⁵ Die dabei entstehenden Transportgüter, die nun nach Fahrzeug- und Emissionsklassen aufgespalten sind, werden den jeweils passenden Datenbankprozessen zugeführt. Für die LKWs wird „GLO: Truck, Euro X, 7,5 t gross weight/ 2,7 t payload capacity ts“ in den Emissionsklassen 4-6 verwendet, für die Lieferwagen entsprechend „GLO: Light duty vehicle, Euro X, up to 3,5 t gross weight/ up to 1,5 t payload capacity ts“. Diese Prozesse enthalten als Input ein Transportgut in kg. Die Distanz kann unter den Instanzeigenschaften angepasst werden und wird im vorliegenden Fall auf die Distanz von 394 km eingestellt. Diese beiden Parameter beeinflussen den Dieselinput und damit die benötigte Energie. Anschließend werden die

³⁰¹ Vgl. Raab, K. (2019); Strittmacher, K. (2019).

³⁰² Vgl. Social Fashion Company GmbH (2020).

³⁰³ Vgl. Google Maps (o.J.d); Google Maps (o.J.e); Google Maps (o.J.f); Google Maps (o.J.g); Google Maps (o.J.h). Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang DHL“.

³⁰⁴ Vgl. Deutsche Post DHL Group (2019), S. 85.

³⁰⁵ Vgl. Deutsche Post DHL Group (2019), S. 85.

Anteile der einzelnen Emissionsklassen von einem Re-Converter wieder zu den Transportmitteln zusammengefasst.

Die Datenbankprozesse für Autos sind nicht für den Gütertransport konzipiert und werden daher auf anderem Weg in die Modellierung der DHL-Flotte mit einbezogen. Die verwendeten Auto-Datensätze „GLO: Car diesel, Euro X, engine size more than 2l ts“ für die Emissionsklassen 4-6 und „GLO: Car LPG, Euro 6 ts“ für die alternativen Antriebe besitzen als Inputs Kraftstoff und das Fahrzeug selbst. Das Auto verlässt den Prozess zusammen mit den zurückgelegten Kilometern als Output. Die Umweltwirkungen des Autos werden anteilig nach den gefahrenen Kilometern an den durchschnittlichen Gesamtkilometern berücksichtigt. Da die Herstellung eines Autos nicht in der verwendeten GaBi-Datenbank verfügbar ist, erfolgt eine grobe Abschätzung anhand der benötigten Werkstoffe. Dafür wird beispielhaft die Auswertung einer Ökobilanz des Fahrzeugherstellers Daimler herangezogen. Die, für die Produktion einer A-Klasse (A180d) mit Dieselantrieb, einem Gewicht von 1.370 kg und einer angenommenen Laufzeit von 160.000 km, benötigten Werkstoffe sind in Abb. 17 mit den verwendeten Datenbankprozessen gelistet.³⁰⁶

Verwendete Werkstoffe	Masse in %	Masse in kg	Verwendeter Datenbankprozess	Masse in kg	Begründung
Stahl- & Eisenwerkstoffe	52,8	723,36	"DE: Steel Billet (31Cr-Mo12-5) ts"	723,36	Höchster Impact unter Steel Billets
Leichtmetalle	11,9	163,03	„DE: Aluminium sheet mix ts“	163,03	
Buntmetalle	3,1	42,47	„EU-25: Copper wire; technology mix, market mix, at plant; cross section 1 mm EC/ELCD“	24,97	Kupfer in Kabeln
			„DE: Lead ts“	17,5	Blei in der Batterie, hier Gewicht der Batterie A180d
Sondermetalle	0,04	0,548	Unter 1%, unterhalb Abschneidekriterium		
Polymerwerkstoffe	21,4	293,18	„DE: Polypropylene fibers (PP) ts“	164,4	12,3% Thermoplasten, Faserverstärkte Kunststoffe
			„DE: Natural rubber (NR) ts“	128,78	6% Elastomere, hauptsächlich in Reifen, also Kautschuk
Prozesspolymere (Lackierung)	1,7	23,29	„EU-28: 2-Ethylhexyl-Acrylate EBAM“	23,29	Polyacrylate
Sonstiges (v.a. Glas)	2,8	38,36	„EU-28: Window glass simple (EN15804 A1-A3) ts“	38,36	
Elektronik (nur Leiterplatten)	0,006	0,0822	Unter 1%, unterhalb Abschneidekriterium		
Betriebsstoffe	6,4	87,68	„DE: Crude oil mix ts“	49,655	Betriebsstoffe: Öl, Kraftstoff (90% Tankfüllung), Bremsflüssigkeit, Waschwasser. Masse Kraftstoff subtrahiert, da dieser separat in Modell einfließt. 50 l Tank zu 90% gefüllt heißt 38,025 kg.

Abb. 17: Übersicht Modellierung Auto, Quelle: eigene Darstellung, in Anlehnung an Daimler AG (2018), S. 10; Amazon (o.J); Deutsches Lackinstitut (2003), S. 22.

³⁰⁶ Vgl. Daimler AG (2018), S. 9 f., 35.

Das Recycling des Fahrzeugs wird an dieser Stelle vernachlässigt und über einen Dummy-Prozess dargestellt, da von der gesamten Fahrleistung nur ein Bruchteil benötigt wird und die Auswirkungen des Recyclings damit als minimal eingeschätzt werden. Die erzeugten Fahrzeugkilometer der einzelnen Emissionsklassen werden danach über einen Converter zur Gruppe Auto zusammengefasst. Die gesamte Transportstrecke von 394 km von Aurach nach Köln wird dabei als Input gleichteilig auf die vier Emissionsklassen verteilt. Als Output wird ein Transportgut von 203 kg festgelegt. Dieses Ladegewicht errechnet sich aus dem gesamten Ladevolumen von 1.157 l des modellierten Fahrzeugs sowie dem Volumen und dem Gewicht der im Transportkarton verpackten MAIRAA Jeans.³⁰⁷ Daraufhin werden alle drei Transportanteile der Gruppen Transporter, LKW und PKW durch einen weiteren Re-Converter Prozess verbunden, der als Inputs die Prozentanteile der Transportmittel auf das Gewicht der verpackten MAIRAA Jeans bezieht und als Output das Jeansprodukt auflistet.

Der Versand erfolgt zwar mit DHL GoGreen, sodass die klimawirksamen Emissionen über Umweltschutzprojekte ausgeglichen werden, diese Kompensationsleistung wird im Modell jedoch nicht berücksichtigt, da diese außerhalb der Systemgrenzen liegt und ausschließlich die Wirkungskategorie GWP betrifft.³⁰⁸ In der anschließenden Interpretation wird untersucht, ob und wie sich ein Ausschneiden des Prozesses auf die gesamten Umweltwirkungen auswirken würde.

Gebrauch

Die Abschätzung der Gebrauchsphase beruht auf verschiedenen generischen Daten, die sich auf die Bekleidungsnutzung in Deutschland beziehen. Da für den geographischen Rahmen keine zusammenhängende, umfassende Studie über das Gebrauchsverhalten von Bekleidung vorliegt, werden verschiedene Untersuchungen herangezogen und miteinander kombiniert. Diese stammen in erster Linie von Statista, der Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz in Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut, dem Industrieverband Körperpflege und Waschmittel e.V. und einer Studie des Elektronikherstellers LG.³⁰⁹ Zur Bestimmung der Tragehäufigkeit eines Jeansmodells wird auf Angaben des Jeanshändlers „Jeans Fritz“ zurückgegriffen, auch wenn diese nicht erkennbar durch eine Studie verifiziert sind, da keine qualitativ abgesicherten Informationen recherchiert werden konnten. Zur Berücksichtigung sowie ggf. zum Ausgleich dieser verminderten Datenqualität werden die sonstigen genannten Angaben dieser Quelle mit vorhandenen qualitativ belastbareren Studien abgeglichen. Da diese eine weitgehende Kongruenz vorweisen, wird die Information als Basis für eine Schätzung

³⁰⁷ Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang DHL“.

³⁰⁸ Vgl. DHL Paket GmbH (o.J.), S. 2.

³⁰⁹ Vgl. Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e. V./ Öko-Institut e. V. (2013a); Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e. V./ Öko-Institut e. V. (2013b); Industrieverband Körperpflege und Waschmittel e.V. (2016); LG Electronics Deutschland (2016); Statista (2017); Statista (2019a).

verwendet. Nachdem die verschiedenen Datenquellen teilweise miteinander verrechnet wurden, hat der länderübergreifende Studienvergleich gezeigt, dass eine hohe Übereinstimmung vorliegt. Insbesondere die Angaben in der PCR eines T-Shirts sind nahezu deckungsgleich.³¹⁰

Die Prozesse der Gebrauchsphase werden alle auf die gesamte Nutzungsdauer skaliert. Eine Jeans wird entsprechend in Deutschland durchschnittlich 3,68 Jahre getragen, bis sie aussortiert wird.³¹¹ Während dieser Zeit wird sie 191,45 Mal getragen und jeweils nach circa 3,63-maligem Tragen gewaschen.³¹² Daraus ergibt sich eine Anzahl von rund 52,74 Waschgängen während der gesamten Nutzungsdauer. Eine durchschnittliche Wäsche verbraucht bei einer Beladung von 6 kg 0,94 kWh Strom und 51,61 l Wasser.³¹³ Bei einem Gewicht von 647 g ergibt sich für die Wäsche des Untersuchungsgegenstands über die gesamte Gebrauchsphase ein Strombedarf von 6,32 kWh und ein Wasserverbrauch von 347,29 l.³¹⁴

8. Gebrauch					
Waschen					
Input			Output		
MAIRAA Jeans	1	pc	MAIRAA Jeans	1	pc
EU-28: Tap Water from groundwater ts“	347,29	l	Waste water	329,93	l
DE: Electricity grid mix ts	6,32	kWh			
DE: Laundry detergent	1,02	kg			
Trocknen					
Input			Output		
MAIRAA Jeans	1	pc	MAIRAA Jeans	1	pc
DE: Electricity grid mix ts	3,19	kWh	Water vapour	17,36	kg
Bügeln					
Input			Output		
MAIRAA Jeans	1	pc	MAIRAA Jeans	1	pc
DE: Electricity grid mix ts	0,36	kWh			

Abb. 18: Tabellarische Input-Output-Übersicht Gebrauchsphase, Quelle: eigene Darstellung, in Anlehnung an: LG Electronics (2016); Jeans Fritz (o.J.); Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e. V./ Öko-Institut e. V.(2013a); Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e. V./ Öko-Institut e. V. (2013b); Statista (2017); Statista (2018); Brommer, E./ Manhart, A. (2013), S. 13; Industrieverband Körperpflege und Waschmittel e.V.(2016).

Unter der Annahme, dass 5 % des Wassers als Feuchtigkeit in der Jeans verbleiben, entstehen 329,93 l Abwasser, die einer lokalen Kläranlage zugeführt werden. Bei einem Waschmittelverbrauch von 81 g je Waschgang, werden insgesamt 1,02 kg

³¹⁰ Vgl. Pesnel, S./ Payet, J. (2019), S. 89.

³¹¹ Vgl. Statista (2019a).

³¹² Vgl. LG Electronics Deutschland (2016); JEANS FRITZ Handelsgesellschaft für Mode mbH (o.J.).

³¹³ Vgl. Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e. V./ Öko-Institut e. V. (2013a).

³¹⁴ Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Gebrauchsphase“.

Waschmittel zur Reinigung der Jeans benötigt.³¹⁵ Unter der Voraussetzung, dass Jeans bei 20 % der Waschgänge im Trockner getrocknet und in 28 % der Fälle gebügelt werden, ist über die gesamte Gebrauchsphase ein zusätzlicher durchschnittlicher Energieverbrauch von 3,19 kWh (trocknen) bzw. 0,36 kWh (bügeln) anzunehmen.³¹⁶ Das während der Gebrauchsphase benötigte Wasser wird durch den Datenbankprozess „EU-28: Tap water from groundwater ts“ modelliert, da in Deutschland 74 % des Trinkwassers aus Grundwasservorkommen stammt.³¹⁷ Ein länderspezifischer Datensatz ist nicht verfügbar. Für die Darstellung der Strombereitstellung wird der deutsche Strommix, als „DE: Electricity grid mix“ herangezogen, da der Konsum in



Abb. 19: Modellierung Waschmittel in GaBi, Quelle: eigene Modellierung.

³¹⁵ Vgl. Industrieverband Körperpflege und Waschmittel e.V. (2016). Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Gebrauchsphase“.

³¹⁶ Vgl. Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e. V./ Öko-Institut e. V. (2013a). Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Gebrauchsphase“.

³¹⁷ Vgl. Umweltbundesamt (2012b), S. 1.

einem durchschnittlichen deutschen Haushalt stattfindet.³¹⁸ Das Waschmittel wird auf Basis der Kombination der Inhaltsstoffe eines typischen Vollwaschmittels kalkuliert, die durch vorhandene Datenbankprozess abgebildet werden und in Abb. 19 dargestellt sind.³¹⁹ Die Abwasserbehandlung erfolgt wie bei Loxxess und AA über „DE: Municipal waste water treatment (variable sludge treatment) ts“. Der beim Auspacken entstehende Papier- und Plastikabfall (101 g bzw. 11 g je Jeans) wird ebenfalls wie bei Loxxess durch die Pläne „EU-28: Paper waste incineration“ und „EU-28: Plastic Waste incineration“ verwertet.

Die hierbei getroffenen Annahmen sind zwar weitgehend durch Studien abgesichert, wobei die Modellierung dieses Produktlebenszyklus-Abschnitts trotzdem einer hohen Unsicherheit unterliegt. Es wird angenommen, dass kulturelle Faktoren sowie soziale Erwünschtheit eines ökologischen Verhaltens die Ergebnisse von Untersuchungen über das Nutzungsverhalten von Bekleidung beeinflussen.³²⁰ Daher werden die hier angenommenen Werte im weiteren Verlauf der Arbeit einer zusätzlichen Sensitivitätsanalyse unterzogen, um zu überprüfen wie sich Änderungen auf das Gesamtergebnis auswirken.

End-of-Life

Die Modellierung des Produktlebensendes unterliegt der Gebrauchsphase ähnlichen methodischen Herausforderungen. Einige Untersuchungen hierzu beruhen auf Verhaltenseinschätzungen von Konsumenten. Andere beziehen sich auf Zahlen von Branchenverbänden. Zudem unterliegen die ermittelten Studien einem unterschiedlichen geographischen Rahmen.³²¹ Dementsprechend widersprüchlich fallen die Ergebnisse teilweise aus. Für die vorliegende Ökobilanz werden die Angaben des Bundesverbandes Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (BVSE) herangezogen, da sich anhand dieser die konkrete Entsorgungssituation in Deutschland nachvollziehen lässt. Zwar stammen die Daten von einer Branchenvereinigung mit verbundenen Geschäftsinteressen, dennoch beziehen sich die Informationen auf volkswirtschaftliche Kennzahlen, wie der Inlandsverfügbarkeit, deren Validität vorausgesetzt wird.³²² Aufgrund der hohen Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Studien, werden die Daten in Kapitel 5.4 *Interpretation und kritische Betrachtung* einer Sensitivitätsanalyse unterzogen.

³¹⁸ Vgl. Social Fashion Company GmbH (2020).

³¹⁹ Vgl. Industrieverband Körperpflege und Waschmittel e.V. (2015). Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Laundry Detergent“.

³²⁰ Vgl. Jack, T. (2013), S. 668, 673; Polizzi Di Sorrentino, E./ et. al. (2016), S. 241.

³²¹ Vgl. Farrant, L./ et. al. (2010); Zamani, B./ et. al. (2014); Korolkow, J. (2015), S. 20; Pesnel, S./ Payet, J. (2019).

³²² Vgl. Korolkow, J. (2015), S. 20.

Nachdem eine Jeans aus unterschiedlichen Gründen aussortiert wurde, folgt das Ende des Produktlebenszyklus. Rund 25 % der Alttextilien werden im Haushaltsmüll entsorgt, sind dadurch entsprechend verschmutzt und nur noch thermisch verwertbar.³²³ Der Haushaltsmüll wird über eine Strecke von 20 km zur Müllverbrennungsanlage transportiert.³²⁴ Da kein Datenbankeintrag für den Transport in einem Müllwagen vorhanden ist, wird stattdessen der Prozess „GLO: Truck, Euro 5, up to 7,5 t gross weight/ 2,7 t payload capacity ts“ mit der entsprechenden Transportdistanz verwendet. Die thermische Verwertung erfolgt über den bereits erläuterten Plan „Textile waste incineration“.

Die anderen 75 % des Textilabfalls werden gesonderten Sammlungen zugeführt und anschließend sortiert.³²⁵ Für den Transport der Altkleider zum Container oder einer anderen Sammelstelle wird aufgrund der hohen Zahl an Sammelstellen in Köln ein Fußweg erwartet.³²⁶ Nach *Dahlbo, H./ et. al.* folgt anschließend ein Transportweg von 97 km zur zentralen Sortierung.³²⁷ Es wird angenommen, dass die Leerung der Container mit einem Lieferwagen erfolgt.³²⁸ Dafür wird der Datenbankprozess „GLO: Light duty vehicle, Euro 5, up to 3,5 t gross weight/ up to 1,5 t payload capacity ts“ verwendet. In der Sortieranlage werden die Textilien in Qualitätsstufen eingeteilt. Für die Modellierung wird unterstellt, dass dieser Schritt manuell erfolgt, da automatische Sortiersysteme bisher kaum etabliert sind.³²⁹ Dabei werden 0,00127 kWh/ kg Altkleider benötigt, die durch den deutschen Strommix abgebildet werden.³³⁰

Die Alttextilien werden im Folgenden vier Verwertungsoptionen zugeführt: (1) Weiterverkauf als Secondhand Ware, (2) Faserrecycling zu Isoliermaterial, (3) thermische Verwertung oder (4) Abfalldeponierung. Die Aufstellung der BVSE nennt außerdem die Verwendung als Putzlappen, welche hier aufgrund der Gewebebeschaffenheit ausgeklammert wird.³³¹ Der entsprechende Anteil wird zum Faserrecycling hinzuaddiert, da die Verarbeitung zu Dämmstoffen einen großen Teil der Denim-Verwertung ausmacht.³³² Modernere Recyclingmethoden, bei denen der Wert des Rohstoffs aufrechterhalten wird, die den Textilabfall mechanisch oder chemisch zu neuem Garn

³²³ Vgl. Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 530.

³²⁴ Vgl. Dahlbo, H./ et. al. (2016), S.6.

³²⁵ Vgl. Korolkow, J. (2015) S. 35.

³²⁶ Vgl. Abfallwirtschaftsbetriebe Köln GmbH (o.J). Allein in der Innenstadt von Köln 31 Abgabemöglichkeiten, andere Stadteile sind ähnlich dicht besiedelt. Dabei handelt es sich nur die Container der ABW und Stadt Köln und caritative Einrichtungen, keine privaten Sammlungen.

³²⁷ Vgl. Dahlbo, H./ et. al. (2016), S. 6.

³²⁸ Vgl. Mercedes Benz AG (o.J), S. 2; Elkoplast (o.J.) S. 2. Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang EoL“.

³²⁹ Vgl. Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 531.

³³⁰ Vgl. Dahlbo, H./ et. al. (2016), S. 7.

³³¹ Vgl. Korolkow, J. (2015), S. 20.

³³² Vgl. Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 529, 531 f.

verarbeiten, werden nicht berücksichtigt, da diese in der verwendeten Studie nicht explizit genannt werden und aktuell im industriellen Maßstab erst selten eingesetzt werden.³³³ Zur Weiterverwendung als Secondhand Ware (1) werden die Artikel zunächst gewaschen und getrocknet. Laut *Zamani, B.* werden je 1 kg Textilien dafür 1,26 MJ Energie und 0,02 kg Waschmittel benötigt.³³⁴ Da kein spezifischer Wasserverbrauch angegeben ist, werden die Verbrauchsdaten einer Haushaltswaschmaschine, entsprechend der Kalkulation der Gebrauchsphase herangezogen, sodass für 1 kg Textilien ein Wasserverbrauch von 8,6 l angenommen wird.³³⁵ Da die Jeans an diesem Punkt die Systemgrenze verlässt, wird ein Ausgleich der Kohlenstoffbilanz durch den Prozess „Ausgleich Kohlenstoffbilanz Cotton EoL“ vorgenommen (siehe Abschnitt *Recycling in der Gewebeproduktion*).³³⁶

Wenn die Altkleider zu Dämmmaterial verarbeitet werden (2), so müssen die Textilien zunächst geschreddert werden. Für diesen Vorgang werden 0,5 kWh Energie pro 1 kg zerkleinertem Material benötigt.³³⁷ Die Verwertung des Baumwollanteils ist dabei identisch mit der Entsorgung der Schnittreste bei der Denim-Authority-Modellierung. Es wird angenommen, dass neben der Baumwollfasern außerdem die Metallkomponenten zurückgewonnen werden, da diese über Magneten leicht herausgefiltert werden können und so die Baumwolle als Dämmstoff nicht verunreinigt wird. Zur Darstellung des Metallrecyclings wird der Datenbankprozess „EU-15: No. 3 steel (unprepared bushling)- scrap credit (open loop) ts“ herangezogen. Dieser beinhaltet die Möglichkeit einer Gutschrift für Stahlschrott aus Ausschnitten und Abfällen mit einer Dicke von weniger als 0,3 cm und berücksichtigt dabei die unterschiedliche Qualität des Recyclingmaterials und des Primärrohstoffs. Dementsprechend wird für 1 kg Stahlschrott 0,4 kg des zur Produktion eingesetzten Neumaterials „EU-28: Stainless steel cold rolled coil (430) Eurofer“ gutgeschrieben. Das Massenverhältnis kann unter den Instanzeigenschaften als Variable verändert werden, wird hier aber beibehalten, da im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Grundlage für eine präzisere Abschätzung ermittelt werden konnte.

Die thermische Verwertung (3) erfolgt, wie beim Anteil der Altkleider, die nicht separat gesammelt werden, deren EoL bereits weiter oben im Abschnitt beschrieben ist.

Die Modellierung des Anteils der gesammelten Altkleider, die der Deponie zugeführt werden (4), erfolgt über „EU-28: Textiles on landfill ts“ und wird ähnlich verknüpft, wie bei der thermischen Verwertung. Die durch das entstehende Deponiegas gewonnene

³³³ Vgl. Rengel (2017), S. 12.

³³⁴ Vgl. Zamani, B. / et. al. (2014), S. 3.

³³⁵ Vgl. Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e. V./ Öko-Institut e. V. (2013b), S. 1. Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Gebrauchsphase“.

³³⁶ Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang EoL“.

³³⁷ Vgl. Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015), S. 537, siehe auch Schreddern bei *Recycling in der Gewebeproduktion*.

Elektrizität wird durch die Verbindung des Energie Inverter Prozesses und dem „EU-28: Electricity grid mix ts“ gutgeschrieben.

5.3 Wirkungsabschätzung (LCIA)

5.3.1 Wirkungskategorien und Relevanz

Zur Abschätzung der Umweltwirkungen des Produktsystems werden die Ergebnisse der Sachbilanz verschiedenen Wirkungskategorien zugeordnet (Klassifizierung). Der entsprechenden Kategorie liegt ein gemeinsamer Wirkungsindikator zu Grunde (z. B. die Freisetzung von Protonen H^+) der mit Hilfe von Charakterisierungsfaktoren zu einer festgelegten Einheit (z. B. kg SO_2 -Äquivalente) verrechnet wird.³³⁸

Die verwendeten Wirkungskategorien sind in Abschnitt 5.1.6 *Wirkungskategorien* bereits mit den entsprechenden Indikatoren, Einheiten und verwendeten Charakterisierungsmodellen tabellarisch aufgeführt. Die Wirkungskategorien wurden aufgrund ihrer Relevanz für die Denimindustrie, anhand der in Kapitel 2.2 beschriebenen ökologischen Hotspots des Jeans-Lebenszyklus, ausgewählt. Hierzu zählen der Energieverbrauch über die gesamte Lebenszeit (a), der Wasserbedarf (b), besonders im Baumwollanbau, der Färberei, der Veredelung und dem Gebrauch, der Einsatz von Düngemitteln (c) und Flächenverbrauch im Faseranbau (d), sowie der Chemikalieneinsatz in der Färberei und Veredelung (e).³³⁹

Der Energiebedarf (a), der in erster Linie durch die Verbrennung fossiler Energieträger gedeckt wird, steht im Lebenszyklus der Jeans als Hauptverursacher für das „Global Warming Potential“ (GWP).³⁴⁰ Dies misst die Steigerung des Strahlungsantriebs, der durch klimawirksame Emissionen (u. a. Kohlendioxid, Wasserdampf, Methan, Lachgas) erzeugt wird und rechnet diese gemäß ihres Treibhauspotentials in CO_2 -Äquivalente (CO_2 -eq.) um.³⁴¹ Der Ausdruck „ CO_2 -Emissionen“ wird im Folgenden aus Gründen der besseren Lesbarkeit synonym mit „ CO_2 -Äquivalente“ verwendet.

Zudem entstehen bei der Verbrennung fossiler Energieträger (a) Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen, die zum Versauerungspotential beitragen.³⁴² Diese werden zu Schwefel- bzw. Salpetersäure oxidiert und gelangen durch sauren Regen in Gewässer und Böden. Zudem werden Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft in der Luft zu Stickoxiden und diese wiederum zu Salpetersäure oxidiert.³⁴³ Ammoniak und Ammonium-Ionen aus dem Einsatz von Düngemittel (c) gelangen außerdem in Gewässer, werden ebenfalls oxidiert und tragen somit zu einer Senkung des pH-Werts von Gewässern bei. Das entstehende „Acidification Potential“ (AP) wird durch die Umrech-

³³⁸ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 275.

³³⁹ Vgl. Jack, T. (2013), S. 666; Paul, R. (2015), S. 3, 6; Rana, S. (2015), S. 195, Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 565, 568, 575; Karthik, T./ Murugan, R. (2017), S. 128; Amutha, K. (2017), S. 32, 40; Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 87;

³⁴⁰ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 253.

³⁴¹ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 254; DIN EN ISO 14050:2010-08, S. 69.

³⁴² Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 274; Umweltbundesamt (2019a), S. 1.

³⁴³ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 273; Umweltbundesamt (2019b), S. 1.

nung der relevanten Emissionen, gemäß deren Freisetzung von Protonen in SO₂-Äquivalente, ausgedrückt.³⁴⁴

Der Einsatz von Düngemitteln im Baumwollanbau (c) trägt neben der Steigerung des AP maßgeblich zum Eutrophierungspotential (EP) bei.³⁴⁵ Eutrophierung bezeichnet ein Nährstoffüberangebot in Ökosystemen, das vorwiegend durch die Elemente Phosphor und Stickstoff bedingt wird.³⁴⁶ Emissionen mit EP sind demnach verschiedene Stickoxide in der Luft, Nitrat und Ammonium im Boden, sowie die genannten Elemente selbst. Zur Berechnung der PO³⁻⁴-Äquivalente wird die relative Düngewirkung der genannten Verbindungen beurteilt.³⁴⁷

Gemäß der Auswertung der vorhandenen Jeans-Ökobilanzen in Kapitel 4.3 *Jeans Produkt* werden die beschriebenen drei Wirkungsgrößen GWP, AP und EP am häufigsten verwendet, wodurch deren Bedeutung hervorgehoben wird.³⁴⁸ In der vorliegenden Untersuchung wird für diese Kategorien, gemäß der Empfehlung der EPD, das Wirkungsmodell CML 2001, Stand 2016, des Instituts für Umweltwissenschaften der Universität Leiden herangezogen.³⁴⁹

Die Problematik des hohen Wasserverbrauchs (b) wird im Folgenden durch die Wirkungskategorie der Wasserverknappung (Water Scarcity) berücksichtigt. Diese wird dem Wirkungsmodell Environmental Footprint 2.0 (EF 2.0) entnommen. Die Berechnungsgrundlage hierfür beruht auf dem AWARE-Modell, das räumliche und zeitliche Dimensionen sowie die Art der Wasserverwendung miteinkalkuliert.³⁵⁰

Der Flächenverbrauch (d) fließt als „Land use“ in die Analyse mit ein und wird ebenfalls über das Wirkungsmodell EF 2.0 dargestellt. Dabei werden die Erosionsbeständigkeit und die mechanischen Filtrationseigenschaften des Bodens sowie die Grundwasserregeneration und die biotische Produktion gleichgewichtig zur einem Indikator verrechnet.³⁵¹

Die toxische Wirkung der eingesetzten Chemikalien (e) wird in der folgenden Auswertung nicht explizit berücksichtigt, da das entsprechende USEtox-Modell systematische Schwächen, wie geringe Präzision und Robustheit, vorweist.³⁵² Zudem fehlen Charakterisierungsfaktoren für den Großteil der Textilchemikalien.³⁵³

³⁴⁴ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 273 f.

³⁴⁵ Vgl. Amutha, K. (2017), S. 32.

³⁴⁶ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 281.

³⁴⁷ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 284 ff.

³⁴⁸ Siehe Kapitel 4.3 *Jeans Produkt*.

³⁴⁹ Vgl. EPD International AB (2019), S. 15; Thinkstep GmbH (o.J.b).

³⁵⁰ Vgl. Fazio, S./ et. al. (2018), S. 25.

³⁵¹ Vgl. Fazio, S./ et. al. (2018), S. 22.

³⁵² Vgl. Textile Exchange (2014), S. 33; Sustainable Apparel Coalition (2019), S. 10; Thinkstep GmbH (o.J.c).

³⁵³ Vgl. Roos, S. (2016), S. 29.

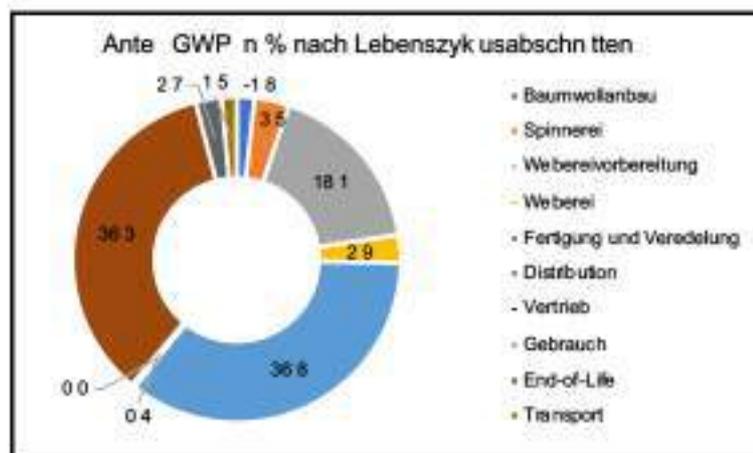
Diese Gesamtauswahl deckt sich weitgehend mit jenen, in der Einleitung erwähnten, Bereichen der planetaren Grenzen, die sich bereits in einem kritischen Zustand befinden.³⁵⁴ Zudem stimmt die Entscheidung weitgehend mit dem Leitfaden zur Erstellung einer EPD für Hosen (siehe Abschnitt 3.3 *Bezugsrahmen der vorliegenden Analyse*) und der vollständig mit Empfehlung der Sustainable Apparel Coalition (SAC) überein.³⁵⁵ Die in der EPD zusätzlich vorgeschlagene Wirkungskategorie der photochemischen Ozonbildung, die zu den Standardkategorien des EPD-Systems gehört, wird ausgeklammert, da diese nicht zu den schwerwiegendsten Einflussfaktoren im Bezug auf Jeans zählt.³⁵⁶

Insgesamt ist bei der Anwendung der Wirkungskategorien die Bezeichnung als Potential zu berücksichtigen. Demnach bilden die Kenngrößen keine zwangsläufig tatsächlichen Auswirkungen, sondern ein relatives Verhältnis ab.³⁵⁷

5.3.2 Vorläufiges Ergebnis

Die Präsentation der vorläufigen Ergebnisse erfolgt anhand der zuvor erläuterten Wirkungskategorien für die einzelnen Abschnitte des Lebenszyklus. Dabei werden die jeweils hauptsächlichen Treiberfaktoren herausgearbeitet. Diese werden in der anschließenden Sensitivitätsanalyse im folgenden Abschnitt näher beleuchtet, im ursprünglichen Modell variiert und gegebenenfalls angepasst. Dieser fortlaufende Prozess spiegelt die Eigenschaft der sich gegenseitig beeinflussenden Abschnitte, der Ökobilanz wieder.³⁵⁸

Global Warming Potential (GWP 100 years) (kg CO₂-eq.)



Über den gesamten Lebenszyklus der MAIRAA Jeans fallen 21,27 kg CO₂-Äquivalent an. Wie in Abb. 20 dargestellt, ist der größte Anteil dabei auf die Fertigung und Veredelung sowie auf die Gebrauchsphase zurückzuführen.

Während des Baumwollanbaus wird zunächst mehr

Abb. 20: Ergebnis Anteil GWP in % nach Lebenszyklusabschnitten, Quelle: eigene Darstellung.

³⁵⁴ Vgl. Steffen, W./ et. al. (2015), S. 736.

³⁵⁵ Vgl. EPD International AB (2019), S. 17; Sustainable Apparel Coalition (2019), S. 9.

³⁵⁶ Vgl. Rana, S. (2015), S. 201; Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 564.

³⁵⁷ Vgl. Textile Exchange (2014), S. 34.

³⁵⁸ Vgl. Periyasamy, A./ et. al. (2017), S. 91; DIN EN ISO 14044:2018-05, S. 7 f.

Kohlenstoff eingebunden als emittiert, da die Faser fast vollständig aus Cellulose besteht, die sich wiederum aus Glucose Bausteinen zusammensetzt, die zu 40 % aus Kohlenstoff bestehen.³⁵⁹

Im ersten Verarbeitungsschritt, der Spinnerei, werden 0,75 kg CO₂-Äquivalent emittiert, die hauptsächlich auf die Stromerzeugung durch das produktionseigene Heizkraftwerk zurückzuführen sind.

In der nachfolgenden Webereivorbereitung, die unter anderem den Prozess der Färberei enthält, entstehen 3,84 kg CO₂-Äquivalent. Diese Menge stammt zu 79,23 % aus der Vorkette des Indigo-Farbstoffs, insbesondere aus dem hierfür benötigten Energiebedarf aus dem chinesischen Strommix. Da der Energieverbrauch auf einer eigenen Berechnung ausschließlich auf Basis der spezifischen Wärmekapazität der jeweiligen Lösemittel basiert, wird diese Abschätzung in der Interpretation noch genauer analysiert. Der Großteil der übrigen CO₂-Emissionen entsteht bei der Dampferzeugung für den Färbe- und Schlichteprozess sowie in der Vorkette der Produktion von Natriumdithionit. Im Herstellungsprozess dessen ist die Emissionsverursachung fast ausschließlich auf das Lösemittel Methanol, welches durch „DE: Ethanol ts“ dargestellt ist, zurückzuführen. Dementsprechend wird die Modellierung des Lösungsmittels in der Interpretation noch einmal im Detail betrachtet und einer Sensitivitätsanalyse unterzogen.³⁶⁰

Der darauffolgende Produktionsschritt der Weberei verursacht Emissionen in Höhe von 0,62 kg CO₂-Äquivalent. Rund die Hälfte hiervon ist auf den Energieverbrauch beim Webprozess zurückzuführen. Die restlichen Emissionen stammen größtenteils ebenfalls aus der Strom- und Dampfbereitstellung, jedoch für die anderen Subprozesse.³⁶¹

Die Produktionsschritte der Fertigung und Veredelung weisen mit 7,81 kg CO₂-Äquivalent die höchsten Treibhausgasemissionen vor. Dabei muss beachtet werden, dass aufgrund von fehlenden Möglichkeiten einer separaten Datenerfassung, die Produktionsschritte der Näherei, sowie die Veredelung in Nass- und Trockenverfahren zusammengefasst sind. Den Ausschlag für diesen hohen Wert geben die beiden eingesetzten Bleichmittel „Nearbleach E-Cloud“ mit 3,33 kg CO₂-Äquivalent und „Nearbleach Sky White“ mit 2,22 kg CO₂-Äquivalent. Bei beiden Prozessen sind die CO₂-Emissionen fast ausschließlich auf den eigens erstellten Plan „Etidronic Acid“ zurückzuführen. Dieser beruht auf einem Patent von *Pandey, S. C./ et. al.* von 2011, der aufgrund der vergleichsweise hohen Aktualität den Prozess ausreichend widerspiegelt. Im diesem Patent wird außerdem auf eine Erhöhung des Ertrags, der Wirtschaftlichkeit und der Verbesserung der ökologischen Performance durch die Erfindung

³⁵⁹ Vgl. Gooch, J. W. (2007), S. 170; Baker, I. (2018), S. 51 f. Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang EoL“.

³⁶⁰ Siehe im elektronischen Anhang: „Datenexport GaBi FINAL.xlsx“

³⁶¹ Siehe im elektronischen Anhang: „Datenexport GaBi FINAL.xlsx“

hingewiesen.³⁶² Vor diesem Hintergrund erscheinen die hohen Emissionen fraglich. Zudem ist auffällig, dass die CO₂-Emissionen nahezu vollständig auf die verwendeten Lösemittel zurückzuführen sind. Da in der Quelle keine expliziten Angaben zur Rückgewinnung der Reaktionsmedien genannt werden, wurde dieser Aspekt in der Modellierung vernachlässigt.³⁶³ Der Vorgang wird jedoch als kontinuierlich bezeichnet, so dass angenommen werden kann, dass die verwendeten Mengen an Lösemitteln nicht nur für einen Durchgang verwendet werden. Somit liegt eine Überschätzung an dieser Stelle nahe. Die Auswirkungen dieses Erklärungsansatzes auf das Modell werden im folgenden Kapitel näher analysiert.

Die Gesamtbilanz der CO₂-Emissionen der Distribution ist leicht negativ, da die Jeans hier in einem Transportkarton aus Pappe verpackt wird, die aus Zellstoff besteht, der sich wie die Baumwolle zum Teil aus Kohlenstoff zusammensetzt. Die dem entgegenstehenden Emissionen, die hauptsächlich aus der Verbrennung der vorherigen Verpackung stammen, wiegen die positive Einbindung von Kohlenstoff nicht vollständig auf. Insgesamt entstehen demnach -0,002 kg CO₂-Äquivalent.

Auch der Betrieb des Headquarters, der die Bereitstellung des Onlineshops miteinschließt, fällt mit 0,08 kg CO₂-Äquivalent kaum ins Gewicht. Am deutlichsten wirken sich hierbei die Flugstrecken mit einem Anteil von 65,35 % aus. Insgesamt können die Emissionen, die bei AA direkt anfallen mit einem Anteil von 0,41 % am Gesamtergebnis jedoch vernachlässigt werden.

Die Transportprozesse, die während des Produktlebenszyklus anfallen, sind mit einem Anteil von 1,5 % in Summe ebenfalls nicht ausschlaggebend. Die Transporte besitzen in Abhängigkeit zur geleisteten Fahrtstrecke und zum Verkehrsmittel unterschiedlich starken Einfluss auf das Ergebnis. Bei den Transportstrecken bis zum Distributionsstandort wird deutlich, dass der Schifftransport auf das Produktgewicht bezogen bei gleicher Strecke weniger CO₂ emittiert als die LKW-Transporte. Die Lieferung vom Lager zum Endkunden wirkt sich mit 48 % der gesamten produktbezogenen Transportemissionen verhältnismäßig deutlich aus. Dies lässt sich unter anderem auf die Nutzung unterschiedlicher Verkehrsmittel zurückführen. Im Vergleich zwischen produktionsbezogenen Transporten (Containerschiff und LKW) und der Auslieferung zum Endkunden (LKW, Lieferwagen und PKW) emittieren jene Verkehrsmittel mit einer großen Ladekapazität bei gleichem Modellierungsansatz produktanteilig tendenziell weniger Emissionen als jene mit einer kleineren Ladefläche. Außerdem fällt auf, dass der Lieferwagen mit EURO 4, also einer schlechteren Emissionsklasse, weniger CO₂ ausstößt als der gleiche Prozess mit einem EURO 5 Modell. Dies ist darauf zurück-

³⁶² Pandey, S. C./ et. al. (2011), S. 10.

³⁶³ Pandey, S. C./ et. al. (2011), S. 11.

zuführen, dass die Emissionsgrenzwerte der EU keine Angaben zum CO₂-Ausstoß machen.³⁶⁴

In Summe werden in der gesamten Produktionsphase, unter einer Cradle-to-Gate Betrachtung, einschließlich des Transports zum Endkunden, 13 kg CO₂-Äquivalent ausgestoßen.

Die anschließende Gebrauchsphase stellt mit 7,72 kg CO₂-Emissionen, den zweitgrößten Emissionsfaktor dar, der jedoch fast gleichwertig zu der größten Quelle, der Bekleidungsfertigung, einzuordnen ist. Die Treibhausgasemissionen stammen dabei in erster Linie aus der benötigten Elektrizität für die Wasch- und Trockenvorgänge sowie aus der Vorkette der Waschmittelproduktion. Der Grund hierfür liegt vor allem in der Häufigkeit der rund 53 Reinigungsvorgänge. Die Auswirkungen der Anzahl der Waschgänge auf das Gesamtergebnis wird in der anschließenden Interpretation genauer betrachtet.

Im Produktlebensende sind vier Entsorgungsmethoden abgebildet, die anteilig ihres Marktvolumens für das Produkt angewandt werden. Insgesamt fallen auf diese Weise 0,56 kg CO₂-Äquivalent an. Auffällig ist hierbei, dass sich die Weiterverwendung als Secondhand Produkt am schlechtesten auf die CO₂-Bilanz auswirkt, obwohl dies der höchsten Recyclingstufe entspricht, da das Produkt in seiner ursprünglichen Funktion erhalten bleibt und somit rein rechnerisch der Produktionsaufwand eines neuen Produkts entfällt. Das Downcycling der Jeans zu Dämmmaterial von geringerem Wert schreibt hingegen durch den Ersatz des Primärstoffs Glaswolle mehr CO₂ gut als emittiert wird. Dieses Verhältnis spiegelt die Verteilung der CO₂-Lasten nicht ausreichend wider und wird daher in Kapitel 5.4 *Interpretation und kritische Betrachtung* einer weitgehenden Analyse unterzogen.

Acidification Potential (AP) (kg SO₂-eq.)

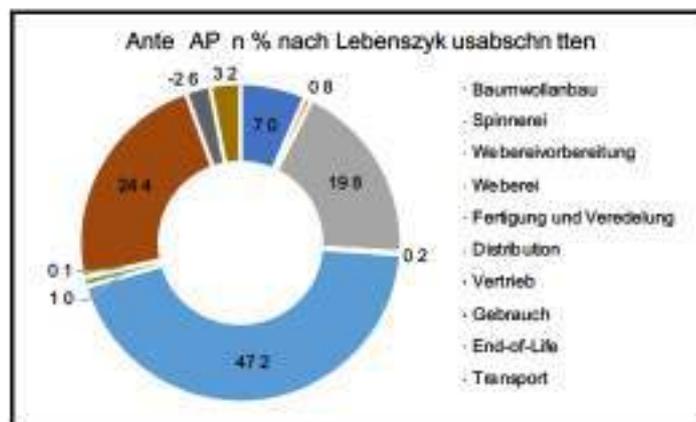


Abb. 21: Ergebnis Anteil AP in % nach Lebenszyklusabschnitten, Quelle: eigene Darstellung.

Bei der Betrachtung des Versauerungspotentials zeigt sich eine der Analyse des GWPs vergleichbare Verteilung (siehe Abb. 21). Diese Ähnlichkeit erklärt sich durch die verschiedenen Emissionen die bei Verbrennungsprozessen fossiler Energieträger emittiert werden. Neben CO₂ werden Schwefeldioxid und Stickoxide frei, die auf das Versauerungspotential

³⁶⁴ Umweltbundesamt (2016).

einwirken.³⁶⁵

Der Emissions-Schwerpunkt liegt erneut in der Fertigung und Veredelung, in diesem Fall jedoch mit großem Abstand (47,2 %). Erneut ist die Umweltwirkung im Wesentlichen auf die in beiden Bleichmitteln enthaltene Etidronsäure zurückzuführen. Außerdem verursacht der Katalysator „Katalin Sky White“ einen deutlichen Anteil des Versauerungspotentials der Fertigung, da bei der Produktion Wasserdampf mit stickstoffhaltigem Ammoniak verdunstet. In dem Patent, dem die Modellierung zugrunde liegt, wird das Gemisch einem Abscheider zugeführt. Der weitere Verbleib des Ammoniaks wird jedoch nicht beschrieben. Daher wurde in der Modellierung der negative Fall einer freien Emission in die Luft angenommen. In industriellem Maßstab ist die Wiederverwendung des Ammoniaks als Ausgangsverbindung für viele Chemikalien naheliegend.³⁶⁶ Die Alternative der Weiterverwendung des Ammoniaks wird im folgenden Kapitel beleuchtet.

Bei der Analyse der Transporte innerhalb der Produktion weist insbesondere der Transport per Containerschiff anteilig einen hohen AP-Wert auf. Dies lässt sich auf die Verbrennung von Schweröl zurückführen, bei der große Mengen an Schwefel- und Stickstoffverbindungen frei werden.³⁶⁷

In der Distribution stammen die Treiberfaktoren für das AP nahezu ausschließlich aus der Produktion der Pappkartons, die laut Prozessdokumentation in GaBi im Sulfid-Verfahren hergestellt werden, das verschiedene Schwefelkomponenten benötigt.³⁶⁸

Während der Gebrauchsphase (24,4 %) stammen die Emissionen an SO₂-Äquivalent aus der Stromerzeugung sowie aus dem Waschmittel, welches sowohl Schwefelverbindungen, als auch Natriumkarbonat enthält. Die Wirkung des Natriumkarbonats könnte auf die Verwendung von Ammoniak während der Herstellung im Solvay-Verfahren zurückzuführen sein.³⁶⁹ Der Einfluss der Webereivorbereitung von 19,8 % ist, wie bereits beim GWP auf den Energiebedarf der Indigoproduktion zurückzuführen. Das Versauerungspotential des Baumwollanbaus beruht, laut der entsprechenden Studie von Textile Exchange, auf der Verbrennung fossiler Energieträger und der Bildung von Ammoniak durch den eingesetzten Stickstoff im Düngeprozess.³⁷⁰

Eutrophication Potential (EP) (kg PO₄³⁻-eq.)

Die Verteilung des Eutrophierungspotentials auf die verschiedenen Verarbeitungsschritte erfolgt nahezu identisch zu der bereits erläuterten Verteilung des Ver-

³⁶⁵ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 273 f.; Textile Exchange (2014), S. 38.

³⁶⁶ Vgl. Willmes, A. (2007), S. 93 f.; U.S. National Library of Medicine (o.J.m).

³⁶⁷ Vgl. International Maritime Organisation (2019).

³⁶⁸ Siehe Datenbankprozess-Dokumentation "US: Corrugated product ts/ AF&PA".

³⁶⁹ Siehe Datenbankprozess-Dokumentation „EU-28: Soda (Na₂CO₃) ts“.

³⁷⁰ Vgl. Textile Exchange (2014), S. 38.

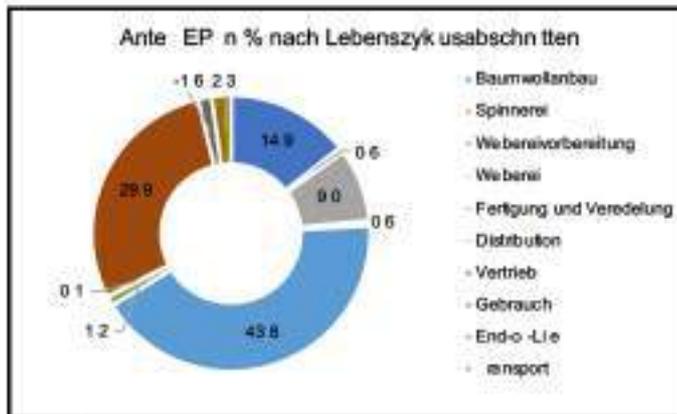


Abb. 22: Ergebnis Anteil EP in % nach Lebenszyklusabschnitten, Quelle: eigene Darstellung.

sauerungspotentials (siehe Abb. 22). Die Quellen innerhalb der jeweiligen Prozesse stimmen ebenfalls fast überein. Diese deutliche Übereinstimmung könnte auf die Stickoxidemissionen bei der Verbrennung fossiler Energieträger zurückzuführen sein, da diese sowohl eine versauernde als auch eine eutrophierende Wirkung beinhalten.

Zudem wirkt das im Dünger enthaltene Ammonium in beiden Kategorien.³⁷¹ Die Auswirkungen der Baumwollgewinnung fallen anteilig höher aus, da durch die Erosion des Bodens mit Hilfe von Dünger eingebrachte Nährstoffe (phosphor- und stickstoffhaltige Moleküle) aus der Erde in nahegelegene Gewässer geschwemmt werden und somit das EP steigern.³⁷²

Land Use (Pt.)

Die Wirkungskategorie der Landnutzung wird zu über 90 % durch den Baumwollanbau hervorgerufen, da hierbei große Flächen zur Nutzung kultiviert werden müssen. Als Agrarprodukt geht mit dem Anbau zwangsläufig eine erhöhte Flächennutzung einher. Für 1 kg Biobaumwolle aus der Türkei, wie sie im vorliegenden Produkt verwendet wird, werden durchschnittlich 5,92 m² benötigt.³⁷³

Water Scarcity (m³-eq.)

Die Wirkungsgröße der Wasserverknappung ist zu 51,8 % auf die Gebrauchsphase, zu 25,2 % auf die Veredelung und zu 18,9 % auf den Baumwollanbau herunterzubrechen. Hierbei sollte bedacht werden, dass der Baumwollanbau und die Veredelung mit der Türkei und Tunesien in arideren Gebieten stattfindet, als der Gebrauch in Deutschland.

Zwischenfazit

Durch die direkte Gegenüberstellung der Treiberfaktoren innerhalb der Lebenszyklusabschnitte in Abb. 23 wird noch einmal deutlich, dass einige Prozesse, die auf mehreren Annahmen beruhen, im Ergebnis der verschiedenen Wirkungskategorien deutlich hervorstechen. Insbesondere gehören dazu der Stromverbrauch bei der Indigoproduktion, die Lösemittel bei der Herstellung der Etidronsäure, die in beiden

³⁷¹ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 273 f., 284 ff.

³⁷² Vgl. Textile Exchange (2014), S. 39.

³⁷³ Vgl. Textile Exchange (2016), S. 58.

	Treiberfaktoren innerhalb der Lebenszyklusabschnitte nach Wirkungskategorien				
	GWP	AP	EP	Land Use	Water Scarcity
Baumwollanbau	Mehr Kohlenstoff eingebunden als emittiert	Verbrennung fossiler Energieträger, Entstehung von Ammoniak aus stickstoffhaltigem Dünger	Stickstoffhaltige Düngemittel, die durch Bodenerosion in Gewässer gelangen.	Flächenbedarf für das Anpflanzen der Baumwolle	Bewässerung Baumwollpflanzen (19 % des Gesamtverbrauchs)
Spinnerei	Stromerzeugung für den Spinnvorgang aus eigener KWK-Anlage	Stromerzeugung für den Spinnvorgang aus eigener KWK-Anlage	Stromerzeugung für den Spinnvorgang aus eigener KWK-Anlage	n.R (<1%)	Dampferzeugung
Webereivorbereitung	Strommix CN in der Indigo-Produktion	Strommix CN in der Indigo-Produktion	Strommix CN in der Indigo-Produktion	n.R (<1%)	Wasser für Färbeprozess und in Vorkette des Strommixes der Indigo-Produktion
Weberei	Stromerzeugung aus eigener KWK-Anlage, insb. für Webprozess	Stromerzeugung aus eigener KWK-Anlage, insb. für Webprozess	Stromerzeugung aus eigener KWK-Anlage für Webprozess + Waste Water Treatment	n.R (<1%)	Wasser für Schlichteprozess, Wasseraufbereitung verringert Water Scarcity
Fertigung & Veredelung	Produktionsvorkette der Lösemittel, die zur Herstellung der Eldronsäure benötigt werden, die in beiden Bleichmitteln enthaltenen ist	Produktionsvorkette der Lösemittel, die zur Herstellung der Eldronsäure benötigt werden, die in beiden Bleichmitteln enthaltenen ist + Ammoniak-Emission bei Herstellung Natrium Persulfate	Produktionsvorkette der Lösemittel, die zur Herstellung der Eldronsäure benötigt werden, die in beiden Bleichmitteln enthaltenen ist + Ammoniak-Emission bei Herstellung Natrium Persulfate	Durch Vorkette des Füllstoffs aus Baumwolle der hier mit enthalten ist.	Wasserbedarf der Veredelung
Distribution	Emissionen aus der Verbrennung von Abfällen aus Papier	Herstellung von Pappe durch Sulfivverfahren, bei dem verschiedene Schwefelkomponenten verwendet werden.	Herstellung von Pappe	n.R (<1%)	Herstellung von Pappe
Headquarter	Flugreisen	Fernwärme aus fossilen Energieträgern	Fernwärme aus fossilen Energieträgern	n.R (<1%)	Wasserverbrauch HQ
Gebrauch	Stromerzeugung für die Waschmaschine und den Trockner	Stromerzeugung für die Waschmaschine und den Trockner + Soda aus Solvay-Verfahren unter Verwendung von Ammoniak aus Waschmittel	Abwasserbehandlung, Stromerzeugung, Soda aus Solvay-Verfahren unter Verwendung von Ammoniak aus Waschmittel	Stromerzeugung für die Waschmaschine und den Trockner	Wasserverbrauch Waschmaschine
End-of-Life	Die Aufbereitung der Jeans zu Secondhand Ware (Reinigung)	Durch die Gütschiff der Glasswolle im Faserrecycling insgesamt negativ.	Durch die Gütschiff der Glasswolle im Faserrecycling insgesamt negativ.	n.R (<1%)	Die Aufbereitung der Jeans zu Secondhand Ware (Reinigung), Gütschiff der Glasswolle im Faserrecycling
Transporte	Lieferung vom Lager zum Endkunden	Transport Türkei-Tunesien, insb. Containerschiff, Verbrennung von Schweröl, hoher Schwefel- und Stickoxidausstoß	Lieferung vom Lager zum Endkunden (41 %), bei Transporten TR-TN-DE jeweils der Containertransport am entscheidendsten	n.R (<1%)	Vorkette der Kraftstoffe, insb. Diesel, Produktion der Autos bei DHL Transport
Gesamt	Fertigung und Veredelung (39,7 %), Gebrauch (39,2 %)	Fertigung und Veredelung (51,88 %), Gebrauch (26,79 %)	Fertigung und Veredelung (45,66 %), Gebrauch (31,18 %)	Baumwollanbau (51,6 %)	Gebrauchsphase (52 %)

Abb. 23: Treiberfaktoren innerhalb der Lebenszyklusabschnitte nach Wirkungskategorien, Quelle: eigene Darstellung.

Bleichmitteln der Veredelung enthalten ist, das Lösemittel bei der Herstellung von Natriumdithionit, die Emission von Ammoniak bei der Produktion von Natriumpersulfat sowie die Waschzyklen der Gebrauchsphase und die Aufarbeitung der Secondhand Ware.

Dementsprechend werden die genannten Punkte in der folgenden Interpretation einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, um bisherige Schwachstellen des Modells differenzierter darzustellen. Zudem werden Unsicherheiten der Modellierung, die in der Inventaranalyse genannt wurden, bisher aber keine relevante Auswirkung auf das Ergebnis

vorweisen, noch einmal genauer analysiert, um sicherzustellen, dass auch bei einer Variation weiterhin kein entscheidender Einfluss auf das Endergebnis besteht

5.4 Interpretation und kritische Betrachtung

5.4.1 Sensitivitätsanalyse

Die zuvor in der in der Inventarmodellierung als potentiell kritisch und in der Inventaranalyse als auffällig herausgearbeiteten Annahmen, werden im Folgenden einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, indem erläutert wird, wie sich Veränderungen dieser relevanten Punkte auf das Gesamtergebnis auswirken. Zudem werden hieraus Empfehlungen für das finale Modell abgeleitet. Zunächst werden die Auffälligkeiten der LCIA betrachtet, bevor die zunächst nicht relevanten, jedoch unsicherheitsbehafteten Faktoren der LCI genauer analysiert werden, um zu prüfen, ob diese bei einer Variation der Annahmen ausschlaggebend werden könnten.

Fall 1: Energiebedarf Indigo-Synthese

Im ursprünglichen Szenario basiert die Abschätzung des Energiebedarfs der einzelnen Prozesse auf der Berechnung der benötigten Wärmeenergie, um die jeweilige Masse an Edukten und Lösemitteln auf die benötigte Temperatur zu erhitzen. Diese Berechnung erfolgt ausschließlich anhand der spezifischen Wärmekapazität der Lösemittel, ohne Berücksichtigung der entsprechenden Reaktionsenthalpie. Aufgrund mangelnder Informationen zur dafür benötigten Standardbildungsenthalpie der Zwischenprodukte kann diese nicht genau berechnet werden.³⁷⁴ Nach Angaben des Produzenten Dystar verläuft die Mehrheit der Prozesse jedoch exotherm, sodass bei der Reaktion Energie frei wird und somit theoretisch weniger Energie eingebracht werden muss, als bisher angenommen.³⁷⁵ Zudem wurde die Konzentration der vorliegenden Mischung auf 1 % geschätzt, wodurch sich die Masse des Lösemittels bestimmt, die integraler Bestandteil der Berechnung des Wärmebedarfs ist und diesen somit entscheidend mit beeinflusst. Mit Erhöhung der Konzentration auf 10 % sinkt das Gesamtergebnis von 21,26 kg auf 18,55 kg CO₂-Äquivalent, was einer Minderung von 12,75 % entspricht. Beiden Emissionen der Webereivorbereitung ist die anteilige Verminderung mit 70,39 % noch wesentlich deutlicher.³⁷⁶

Zudem wird in der ursprünglichen Modellierung angenommen, dass jeder Produktionsdurchgang erneut von der Raumtemperatur ausgehend auf die Reaktionstemperatur erhitzt werden muss und keine Wärmerückgewinnung stattfindet. Studien des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung und des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) gehen von einem technisch-wirtschaftlichen

³⁷⁴ Vgl. Heintz, A. (2017), S. 691 ff.

³⁷⁵ Vgl. Schmidt, A. J. (2020), Mail vom 24.02.2020.

³⁷⁶ Siehe im elektronischen Anhang: „Modellierung Sensitivitätsanalyse.xlsx“, „Fall 1: Indigo“. Siehe Abb. 24.

Nutzungspotential von Abwärme in der deutschen Industrie von 5-18 % aus.³⁷⁷ Infolge der Annahme einer optimalen Weiternutzung verringern sich die CO₂-Emissionen, um 2,19 % auf Gesamtebene und um 12,09 % auf Prozessebene.³⁷⁸

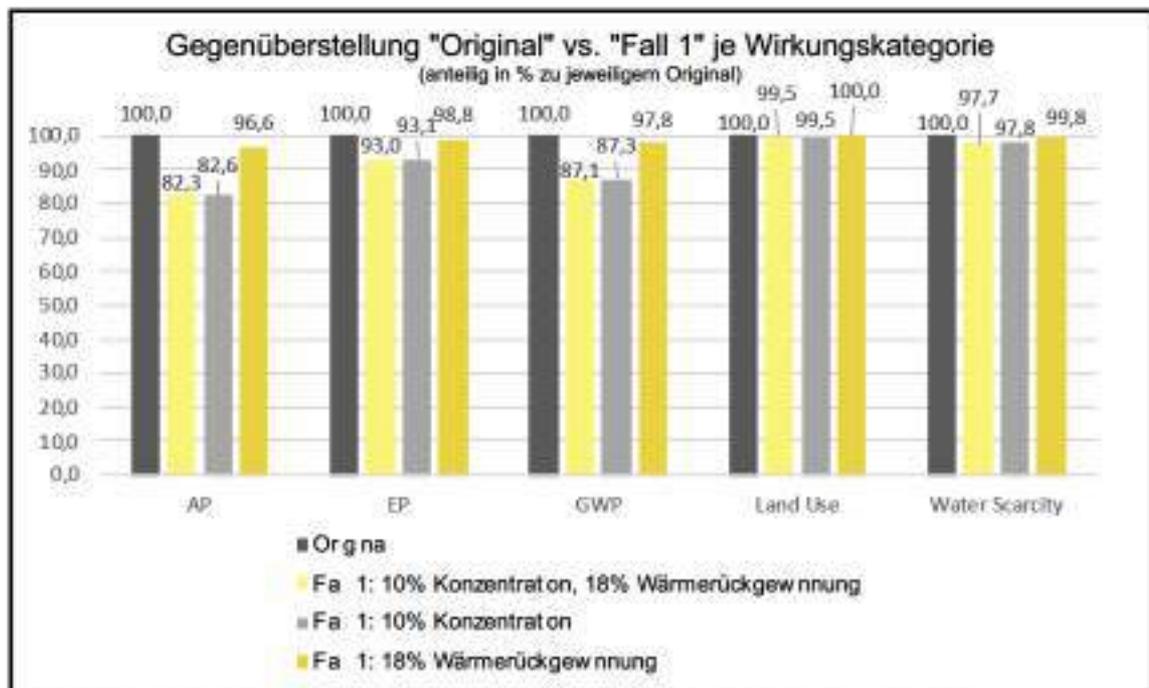


Abb. 24: Gegenüberstellung von „Original“ vs. „Fall 1“ je Wirkungskategorie, Quelle: eigene Darstellung.

In Kombination der beiden veränderten Annahmen entsteht ein maximal optimistisches Szenario („Fall 1: 10 % Konzentration, 18 % Wärmerückgewinnung“), das dem ursprünglichen Modell („Original“), welches auf maximal pessimistischen Annahmen beruht sowie den anderen beiden Optionen gegenübergestellt wird (siehe Abb. 24). Dabei ergibt sich nur aufgrund der Unsicherheiten innerhalb der Modellierung der Indigoproduktion eine Schwankung im Endergebnis der CO₂-Emissionen von 12,92 %. Abb. 24 zeigt darüber hinaus die Auswirkungen dieser Variationsbreite im Hinblick auf die anderen herangezogenen Wirkungskategorien. Zur Darstellbarkeit innerhalb eines Diagramms sind die Werte prozentual am jeweiligen Gesamtwert der ursprünglichen Modellierung skaliert. Dabei wird deutlich, dass die vorgenommene Veränderung das Gesamtergebnis in den Kategorien GWP, AP und EP deutlich beeinflusst, da der Stromverbrauch der Indigoproduktion hier jeweils einen hohen Einfluss besitzt. Dies lässt sich auf die Vielzahl der unterschiedlichen Emissionen bei der Verbrennung fossiler Energieträger zurückführen. In erster Linie wirken die CO₂-Emissionen auf GWP, die NO_x-Emissionen auf das AP, sowie EP und die SO₂-Emissionen zusätzlich auf das AP.³⁷⁹ Dass alle drei genannten Emissionen hauptsächlich in der Energieerzeugung

³⁷⁷ Vgl. Pehnt, M./ et. al. (2010), S.19; Hirzel, S./ et. al. (2013).

³⁷⁸ Siehe im elektronischen Anhang: „Modellierung Sensitivitätsanalyse“, „Fall 1: Indigo“.

³⁷⁹ Vgl. Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009), S. 253 ff.; Umweltbundesamt (2019c), S. 1.

anfallen, erklärt deren großen Einfluss auf alle drei Kategorien.³⁸⁰ In Anbetracht der deutlich relevanten Auswirkung in drei der fünf ausgewählten Wirkungskategorien wurde erneut Kontakt zum Hersteller aufgenommen und um eine Einschätzung der Sachlage gebeten. Demnach befindet sich die ursprüngliche Abschätzung in der richtigen Größenordnung, da große Teile des Strombedarfs z. B. durch Antriebe für Pumpen und Rührwerke verursacht werden, die in der vorliegenden Herangehensweise nicht mit berücksichtigt wurden.³⁸¹ Dementsprechend wird der ursprüngliche Ansatz im finalen Modell beibehalten.

Fall 2: Natriumdithionit

Natriumdithionit wird, wie der Indigo-Farbstoff, ebenfalls in der Webereivorbereitung verwendet und steht in hierbei an zweiter Stelle der Verursacher des GWPs und APs, sowie an dritter Stelle des EP. In der ursprünglichen Modellierung entfallen zwar nur 1,21 % der gesamten CO₂-Emissionen auf diese Chemikalie, dennoch ist auffällig, dass dies fast ausschließlich (zu 80,3 %) durch das enthaltene Lösemittel Methanol verursacht wird, welches durch „DE: Ethanol ts“ abgebildet ist. Hierbei wurde der pessimistische Fall angenommen, dass das organische Lösungsmittel dem Abwasser zugeführt wird, ohne wiedergewonnen zu werden. Eine Aufbereitung zur Wiederverwertung kann jedoch mittels Adsorption, Destillation, Extraktion und Filtration durchgeführt werden.³⁸² Da das Natriumdithionit unter dem Markennamen HydroBlue in Deutschland bei BASF hergestellt wird, ist anzunehmen, dass sowohl aus Kosten- als auch Umweltgründen eine Rückgewinnung stattfindet.³⁸³ Laut Herstellerangaben der hierzu benötigten Anlagen ist bei organischen Lösungsmitteln eine Recyclingquote von über 90 % möglich.³⁸⁴ Capello, C./ et. al. ermitteln in ihrer Meta-Analyse von LCI-Daten eine Rückgewinnungsquote für Lösemittel zwischen 31 % und 97 %, wobei der Durchschnitt bei 71 % liegt.³⁸⁵ Zur näheren Beurteilung der einzelnen Optionen werden die beiden Extremvarianten „keine Rückgewinnung“ und „97 % Rückgewinnung“ gegenübergestellt sowie mit dem Durchschnittswert von Capello/ et. al. verglichen.

Die Auswirkungen beider Variationen auf das Gesamtergebnis liegen in allen Kategorien bei maximal 0,72 % Abweichung. Die Veränderungen auf Ebene der Webereivorbereitung sind ebenfalls gering. Unter Betrachtung des Natriumdithionits wird der Einfluss der alternativen Modellierung deutlich. Dabei werden das GWP, AP, und EP bei der Option „Fall 2 (71 %)“ jeweils um 32-47 % verringert. Bei Option „Fall 2 (97

³⁸⁰ Vgl. Umweltbundesamt (2018), S. 1; Statista (2020), S. 1.

³⁸¹ Vgl. Schmidt, A. J. (2020), Mail vom 24.02.2020.

³⁸² Vgl. Völker, E./ et. al. (2011), S. 507.

³⁸³ Vgl. Orta Anadolu Tic. ve San. İ̇şl. A.Ş. (2020).

³⁸⁴ Vgl. OFRU Recycling GmbH & Co. KG (o.J); Maratek Environmental Inc.(o.J), Air Products GmbH (o.J);

³⁸⁵ Vgl. Capello, C./ et. al. (2005), S. 5890.

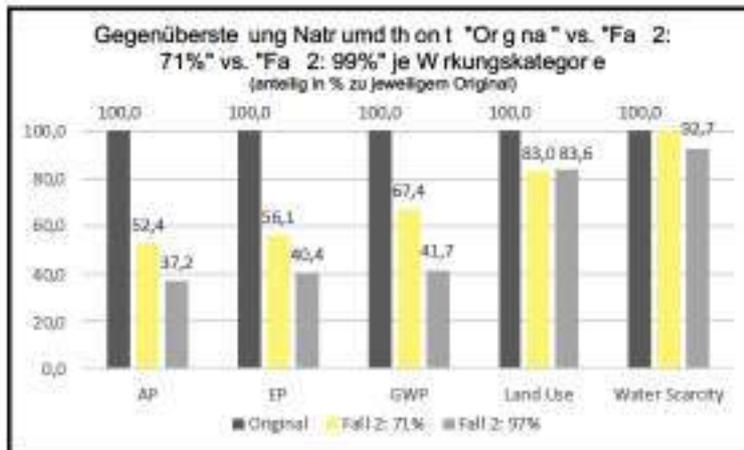


Abb. 25: Gegenüberstellung von Natriumdithionit im „Original“ vs. „Fall 2: 71 %“ vs. „Fall 2: 99 %“ je Wirkungskategorie, Quelle: eigene Darstellung.

%)“ fällt die Reduktion entsprechend stärker aus, sodass in den genannten Kategorien eine Verminderung zwischen 58 % und 62 % verzeichnet wird. Die entsprechende Verminderung in der Kategorie „Land use“ fällt etwas geringer aus.

Zwar ist die durchgeführte Variierung für das Ende-

ergebnis nicht entscheidend, dennoch wird die Rückgewinnung von 71 % des Lösemittels als Verbesserung in das finale Modell eingearbeitet, da dies den Herstellungsprozess in Deutschland genauer widerspiegelt. Hierbei behält Ethanol, mit einem Anteil von 41,75 %, weiterhin eine relevante Rolle in der Herstellung des Natriumdithionits. Da für die Produktion des Ethanols durch Hydrierung von Ethen hohe Temperaturen sowie Druck benötigt und die Konversionsrate mit 5,6 % gering ausfällt, ist dieser Einfluss akzeptabel.³⁹⁶

Fall 3: Etidronsäure

Wie zuvor bereits erläutert ist die Etidronsäure in beiden Bleichmitteln „Nearbleach E-Cloud“ und „Nearbleach Sky White“ enthalten, die bei der Veredelung eingesetzt werden. Deren ausschlaggebender Einfluss auf das Gesamtergebnis, als auch auf das Teilergebnis der Fertigung und Veredelung, wurde in der Betrachtung des vorläufigen Ergebnisses herausgearbeitet und auf die hohe Relevanz der Lösungsmittel dabei hingewiesen. Deren Bedeutung ist deutlich entscheidender als bei dem zuvor behandelten Natriumdithionit, die dahinterstehende Fragestellung, wie viel des Lösungsmittels aus dem Prozess zurückgewonnen und wieder eingesetzt werden kann, ist jedoch die Gleiche. Aufgrund mangelnder Informationen zu deren Modellierung im verwendeten Patent, wurde im ursprünglichen Modell zunächst erneut die maximal pessimistische Option gewählt, in der kein Lösemittel zurückgeführt wird. Da der Prozess in der Quelle jedoch als kostengünstiger sowie umweltschonender als bisherige Methoden beschrieben wird und der Prozess kontinuierlich abläuft, ist eine Rückgewinnung und/oder Weiternutzung zu einem bestimmten Grad sehr wahrscheinlich.³⁹⁷ Die Lösemittel werden sogar explizit als wiederverwendbar bezeichnet, ein Anteil hierzu wird jedoch

³⁹⁶ Vgl. Sayaera, H./ et. al. (2014), S. 3. Siehe Datenbankprozess-Dokumentation „DE: Ethanol ts“.

³⁹⁷ Vgl. Pandey, S. C./ et. al. (2011), S. 11.

nicht genannt.³⁸⁸ Um eine verifizierte Abschätzung dazu abgeben zu können, wird erneut die Untersuchung von *Capello, C./ et.al.* herangezogen. Aufgrund der hohen Bedeutung für das Gesamtergebnis werden, neben dem ursprünglichen pessimistischen Szenario, drei weitere Optionen betrachtet: eine Rückgewinnungsquote von 31 %, von 71 % und von 97 %. Dies entspricht dem niedrigsten Wert, dem Mittelwert und dem Höchstwert, den *Capello, C./ et. al.* in ihrer Analyse von 150 generischen Inventardaten zur Destillation zur Rückgewinnung von Lösemitteln erfasst haben.³⁸⁹ Zur Modellierung der Aufbereitung werden als Inputs und Outputs die ermittelten Durchschnittswerte der genannten Studie verwendet. Die verbleibenden Rückstände werden anhand der entgegengesetzten Extremwerte der Rückgewinnungsquoten ausgewählt.³⁹⁰ Alternativ wurde der Ansatz in Erwägung gezogen, den Input der Lösemittel anteilig zu verringern und den Output einer Verbrennungsanlage zuzuführen. Dieser wurde allerdings verworfen, nachdem infolge der beispielhaften Modellierung mit einem Rückgewinnungsanteil deutlich wurde, dass die beiden Ansätze nur marginal voneinander abweichen und die Darstellung der Rückgewinnung die tatsächlichen Umstände besser widerspiegelt.

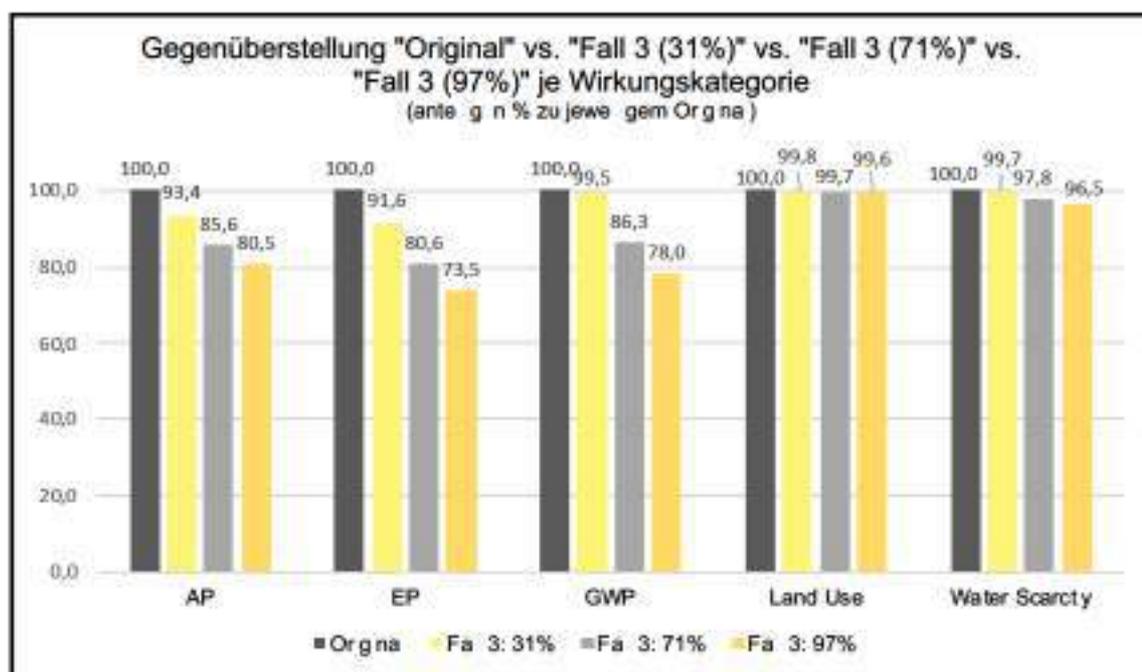


Abb. 26: Gegenüberstellung „Original“ vs. „Fall 3: 31 %“ vs. „Fall 3: 71 %“ vs. „Fall 3: 97 %“ je Wirkungskategorie, Quelle: eigene Darstellung.

Abb. 26 zeigt die Gegenüberstellung der Gesamtergebnisse der drei untersuchten Alternativen im Vergleich zur ursprünglichen Modellierung. Hierbei wird deutlich, dass die Höhe der Lösemittelrückgewinnungsquote in der Produktion der Etidronsäure einen

³⁸⁸ Pandey, S. C./ et. al. (2011), S. 10.

³⁸⁹ Capello, C./ et. al. (2005), S. 5889.

³⁹⁰ Capello, C./ et. al. (2005), 5889. Maximalwert Rückgewinnung in Kombination mit dem Minimalwert des verbleibenden Rückstands und umgekehrt.

signifikanten Einfluss auf das Endresultat in den Kategorien AP, EP und GWP hat. Die Schwankungsbreite liegt hierbei jeweils zwischen 19,5 % und 26,5 %. Für das finale Endergebnis wird die Variante des Mittelwerts mit 71 % Recyclingquote des Lösemittels angenommen, da das zur Modellierung verwendete Patent, wie oben beschrieben, eine mögliche Rückführung explizit benennt. Die technologischen Möglichkeiten haben sich seit 2005, dem Erscheinungsjahr der Quelle, jedoch eher weiter entwickelt, sodass der Anteil der Rückgewinnung vermutlich eher im höheren Bereich liegt. Die Annahme des Mittelwerts von 2005 ist somit weiterhin als eher konservative Schätzung einzuordnen.

Fall 4: Natriumpersulfat

In der Analyse der vorläufigen Ergebnisse konnte im Prozessabschnitt Fertigung und Veredelung eine weitere Auffälligkeit beobachtet werden. Neben den zuvor beleuchteten Bleichmitteln, verursacht der eingesetzte Katalysator „Katalin Sky White“ mit 25,24 % einen signifikanten Anteil der Emissionen in den Bereichen AP und EP. Diese lassen sich, wie im vorherigen Abschnitt bereits erläutert, voraussichtlich auf die Emission eines Wasserdampf-Ammoniak-Gemischs während der Produktion zurückführen. Für die Modellierung wurde zur Sicherheit die maximal negative Variante der freien Emission in die Luft gewählt, da das Patent, welches als Modellierungsgrundlage gilt, das Gemisch zwar einem Abscheider zuführt, der weitere Verbleib jedoch ungeklärt bleibt. Die Tatsache, dass der Wasserdampf und der Ammoniak vorsätzlich voneinander getrennt werden, macht eine weitere Verwertung oder Behandlung jedoch wahrscheinlich.³⁹¹ Demnach kommen die weitere Nutzung und die Verbrennung als Optionen in Frage.

Wie in Abb. 27 deutlich, vermindert die Weiterverwendung das AP und EP um jeweils 8,9 % bzw. 8 %. Somit wird eine weitere Unsicherheit im ursprünglichen Modell deutlich. Da der Ammoniak durch den Abscheider wahrscheinlich bereits in relativ hoher Reinheit vorliegt und angenommen werden kann, dass in industriellem Maßstab in Summe große Mengen Ammoniak anfallen, wird die Weiterverwendung als wahrscheinlichste Option angesehen. Hinzu kommt die Tatsache, dass Ammoniak in der Produktion des Vorprodukts Ammoniumsulfat verwendet wird, welches für die Herstellung von Natrium Persulfat benötigt wird.³⁹² Demnach kann der Ammoniak gegebenenfalls direkt zurückgeführt werden, insofern die Synthese werksintern stattfindet. In Summe führt dies zu der Entscheidung die Weiterverwendung des Ammoniaks in das Endmodell zu integrieren.

³⁹¹ Vgl. Flach, D./ Garver, R. (1959), S. 4.

³⁹² Siehe Datenbankprozess-Dokumentation „DE: Ammonium sulphate (Caprolactam production) ts“.

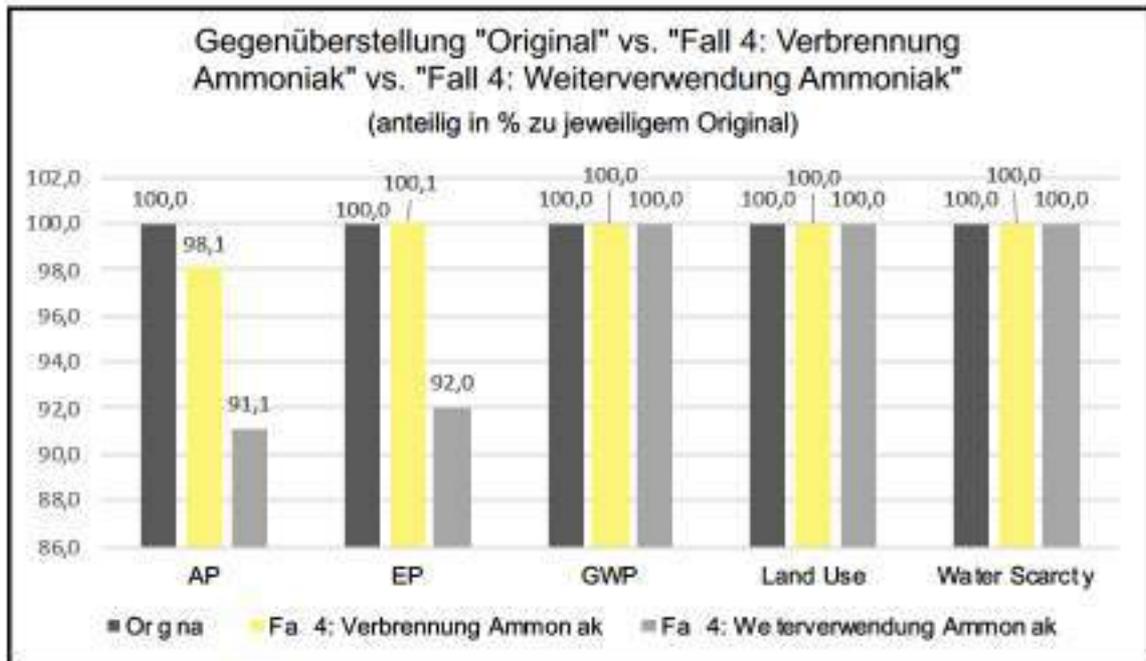


Abb. 27: Gegenüberstellung „Original“ vs. „Fall 4: Verbrennung Ammoniak“ vs. „Fall 4: Weiterverwendung Ammoniak“ je Wirkungskategorie, Quelle: eigene Darstellung.

Fall 5: Waschgewohnheiten

Da die Waschgewohnheiten von individuellen Gewohnheiten abhängen, ist eine hohe Variation im tatsächlichen Gebrauch anzunehmen. Um dieser Diversität gerecht zu werden, ist eine variable Betrachtung dieses Produktlebensabschnitts notwendig. Hierzu werden die Annahmen anderer Studien verglichen, um alternative Varianten zu entwickeln. So gehen Roos, S./ et. al. und Hedman, E. beide von je 20 Wäschen über den gesamten Lebenszyklus aus, was in deren Kalkulation einer Wäsche nach jedem 10. Mal Tragen entspricht. In der eigenen Modellierung wird bereits nach 3,63-maligem Gebrauch gewaschen.³⁹³ Wird das Verhältnis von der Waschkhäufigkeit und Nutzung in die vorliegende Untersuchung übertragen, verändert sich das Resultat wie in Abb. 28 dargestellt. Zudem ist das denkbar negativste Szenario des Waschens nach jedem Tragen mit einbezogen.

Die Abweichung durch das Nutzungsprofil liegt demnach, allein durch die Waschintervalle, in der Kategorie GWP bei $\pm 117,1$ %, bei der Water Scarcity sogar bei ± 169 %. Dabei stellt der hier angenommene positive Extremfall (nach 10 Mal tragen ein Waschvorgang) den Durchschnittswert anderer Quellen dar und kann somit als im Gebrauch relativ häufig angenommen werden. Höhere Extremwerte wären hier denkbar, sodass die Schwankung noch höher ausfallen würde. Hieraus lassen sich verschiedene Schlüsse ziehen: Einerseits ist der Einfluss des Konsumenten auf die Gesamtbilanz bedeutend, sodass für AA hier ein Ansatzpunkt für sensibilisierende

³⁹³ Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang Gebrauchphase“.

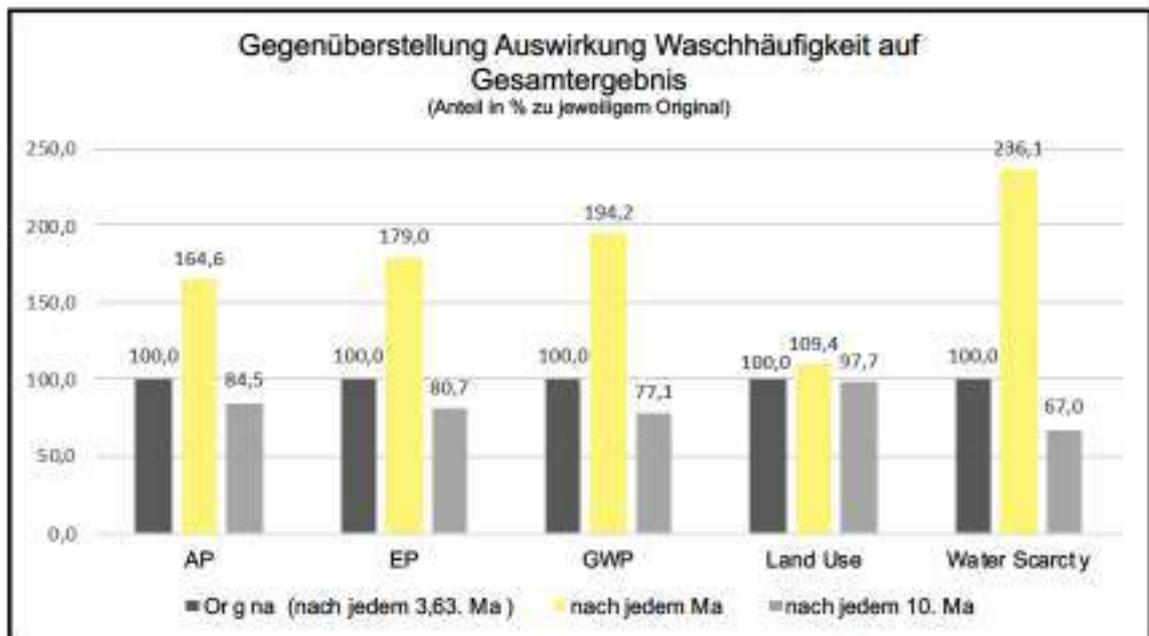


Abb. 28: Gegenüberstellung Auswirkung der Washhäufigkeit auf das Gesamtergebnis, Quelle: eigene Darstellung.

Kommunikation an den Kunden besteht. Andererseits wird unter methodischen Gesichtspunkten die Herausforderung deutlich, das variable Nutzungsverhalten adäquat abzubilden. Ohne vorhandenes, standardisierendes Regelwerk ist ein Vergleich von Produkten allein aufgrund dieser Spanne aus wissenschaftlicher Sicht nicht haltbar. Gelöst werden könnte dieses Problem mit einer PCR für Hosen bzw. Jeans, welche die gleiche Detailtiefe der PCR eines T-Shirts vorweist. Hierin sind u. a. Standardwerte zur Modellierung der Gebrauchsphase enthalten.³⁹⁴ Eine solche Richtlinie befindet sich zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Arbeit jedoch noch in der Pilotphase und ist demnach öffentlich nicht zugänglich.³⁹⁵ Für die vorliegende eigene Untersuchung wird das Verhältnis von Waschen und Tragen auf fünf erhöht, da sich die Berechnung dieser Angabe auf sämtliche Arten von Beinbekleidung bezieht und angenommen wird, dass Jeans im Vergleich eher seltener gewaschen werden. Zudem sind die Kunden von AA generell eher nachhaltigkeitsaffin, sodass ein gewisses Bewusstsein für die Problematik angenommen werden kann. Im Vergleich zu den anderen Studien wird die AA Jeans folglich noch immer fast doppelt so häufig gewaschen, sodass der verbesserte Wert noch immer als konservative Einschätzung betrachtet werden kann.

Fall 6: End-of-Life

a) In der Analyse der vorläufigen Ergebnisse ist beim Produktlebensende, wie oben beschrieben, ein Missverhältnis zwischen den Optionen Faserrecycling (low quality) und der Weiternutzung als Secondhand Produkt aufgefallen. Demnach stellt die Ver-

³⁹⁴ Vgl. Pesnel, S./ Payet, J. (2019).

³⁹⁵ Vgl. Europäische Kommission (2019).

wertung als Secondhand Ware im aktuellen Modell die ökologisch schlechteste Möglichkeit der Entsorgung dar, während das Faserrecycling die geringsten Umweltlasten verursacht bzw. sogar deutlich mehr Emissionen gutschreibt als verursacht werden. Dieses Ungleichgewicht lässt sich auf die Entscheidung für oder gegen Gutschriften zurückführen. Während für das Faserrecycling ursprünglich eine Gutschrift für Glaswolle ohne Korrekturbetrag der erbrachten Leistung vorgenommen wurde, fehlt bei der Secondhand-Option jegliche Gutschrift. Diese Entscheidung war ursprünglich darin begründet, dass nicht abgeschätzt werden kann, ob die Secondhand Jeans tatsächlich ein Neuprodukt ersetzt oder aufgrund des niedrigen Preises zusätzlich erworben wird und eine Gutschrift somit unberechtigt wäre.

Zur Abschätzung einer Alternative wird zunächst der Wiederverkaufspreis einer AA-Jeans auf verschiedenen Plattformen als Anhaltspunkt herangezogen.³⁹⁶ Dabei ergibt sich eine Wertminderung von 53,78 % gegenüber dem Neupreis, wobei es sich dabei vorwiegend um neue oder neuwertige Ware handelt. Da die vorliegende Untersuchung von einer Nutzungsdauer von 3,68 Jahren ausgeht, sind die resultierenden Secondhand Produkte nicht als solche zu klassifizieren. Die Gutschrift erfolgt in der Variation demnach mit einem geringeren Betrag von geschätzten 10 %.

Für das Faserrecycling wird statt dem bisherigen gleichwertigen Ersatz als Alternative ein Korrekturwert von 50 % angenommen, der als konservative Schätzung eingeordnet wird, da die benötigte Masse des Fasermaterials entsprechend zunimmt, wenn die gleiche isolierende Leistung wie von Glaswolle erbracht werden soll. Das mit der steigenden Masse einhergehende Volumen wird als kritische Größe in der Verwendung betrachtet. Daher würde die Faser ab einer gewissen Schwelle die Isolierleistung nur noch in großer Menge erbringen können, was einer praktikablen Nutzbarkeit widerspricht.

Um die Auswirkungen der ursprünglich getroffenen Festlegungen auf das Gesamtergebnis nun zu analysieren, wird wie beschrieben für das Faserrecycling ein Korrekturwert von 50 % der Leistung angenommen (1), für die Secondhand-Option eine Gutschrift von 10 % modelliert (2). Diese beiden Möglichkeiten werden miteinander kombiniert (3) und mit der Ausgangslage (4) verglichen.³⁹⁷ Die Veränderung des Gesamtergebnisses bleibt mit max. ± 4 % vergleichbar gering. In Kombination (3) der beiden Variationen stellt sich das Verhältnis der Recyclingwertigkeiten passend dar. Für Secondhandware wird insgesamt eine Gutschrift in Form einer Negativemission erteilt, für das Faserrecycling gilt das Gleiche in geringerem Maße. Für die Verbrennung im unsortierten Haushaltsabfall fallen die höchsten Emissionen an. Da diese Version die tatsächlichen Gegebenheiten jedoch am präzisesten widerspiegelt und die

³⁹⁶ U. a. Kleiderkreisel.de, Mädchenflohmarkt.de. Siehe im elektronischen Anhang: „Modellierung Sensitivitätsanalyse“, „Fall 6: EoL“.

³⁹⁷ Siehe im elektronischen Anhang: „Auswertung Fall 6“.

dadurch verursachte Veränderung weniger als 2 % beträgt, wird diese Änderung in das ursprüngliche Modell übernommen.

b) Da die Informationen zur Aufteilung der Recyclingströme in Deutschland aus einer Quelle eines Industrieverbandes stammen, die anderen Studien über die Situation in Europa fast diametral gegenüberstehen, wird eine alternative Modellierung der Verteilung anhand der Informationen aus der PCR des T-Shirts durchgeführt.³⁹⁸ Die Darstellung der einzelnen Optionen selbst bleibt dabei bestehen, wobei die zuvor erarbeiteten Verbesserungen noch nicht beinhaltet sind, da zunächst der Vergleich zur ursprünglichen Modellierung gezogen wird. Während die Veränderung der CO₂-Emissionen hierbei unter +0,8 % bleibt, sind die Auswirkungen beim AP und EP mit +2,5 % bzw. +6,1 % Steigerung deutlicher. In den Kategorien *Land Use* und *Water Scarcity* beträgt die Veränderung jeweils $\pm 0,1$ %.³⁹⁹

Fall 7: Überprüfung der Relevanz von unsicheren Schätzungen aus LCI

Die im folgenden bearbeiteten Punkte beruhen, wie einige bereits untersuchte Aspekte, auf groben Abschätzungen, die eine weitere Unsicherheit im Modell darstellen könnten. In der aktuellen Modellierung stellen diese im Hinblick auf das Gesamtergebnis zwar keine ausschlaggebenden Aspekte dar, trotzdem wird an dieser Stelle überprüft, ob sie auch dann noch geringe Auswirkungen erzeugen, wenn die zugrundeliegenden Annahmen modifiziert werden.

a) Der Transport zum Endkunden erfolgt per DHL GoGreen, bei dem das Logistikunternehmen eine CO₂-Kompensationszahlung organisiert, deren Kosten an AA weitergegeben werden. Damit werden die Transporte als CO₂-neutral bezeichnet. Im Modell wurde diese Tatsache vernachlässigt, da das Weglassen des Prozesses die Nicht-GWP-Emissionen außer Acht gelassen hätte. Die genauere Betrachtung zeigt einen nur sehr geringen Einfluss dieser Entscheidung auf das Gesamtergebnis von maximal 0,7 % über alle Wirkungskategorien. Da dies jedoch auch die Wirkungsgrößen betrifft, die bei einem Fehlen des Prozesses ohne Rechtfertigung mit abgeschnitten würden, ist die ursprüngliche Modellierung beizubehalten.

b) Die Einschätzung der Emissionsklassen der LKW-Transporte beruht auf statistischen Daten zur Erstzulassung der LKW in Tunesien bzw. des Alters der insgesamt zugelassenen LKWs in der Türkei. Über die Zeitpunkte der Veröffentlichungen der Emissionsnormen wurden hieraus Rückschlüsse auf die jeweiligen EURO-Klassen

³⁹⁸ Vgl. Pesnel, S./ Payet, J. (2019), S. 92.

³⁹⁹ Siehe im elektronischen Anhang: „Auswertung Fall 6“.

gezogen und daraus Mittelwerte berechnet.⁴⁰⁰ Aufgrund der Tatsache, dass die Zuordnung der LKW in die Emissionsklassen dadurch nur annähernd abgeschätzt werden kann und die entsprechenden Normen darüber hinaus weder in der Türkei noch in Tunesien Gültigkeit besitzen, wird diese Einschätzung überprüft. Hierzu wurden die betreffenden EURO-3 und -4 LKW-Transporte alle durch EURO-2 Modelle ersetzt. Das Resultat zeigt eine geringe Abweichung von max. 0,3 % im Gesamtergebnis, sodass eine Anpassung nicht erforderlich erscheint. Auch im direkten Vergleich der Prozesse ist der Unterschied unmaßgeblich.

c) Da in der GaBi-Datenbank keine Prozesse für Personentransporte per Flugzeug vorliegen und diese ohnehin nur aus Vollständigkeitsgründen mit berücksichtigt sind, erfolgt die Abschätzung der Umweltwirkungen im ursprünglichen Modell anhand der Berechnung von Atmosfair, die alle klimawirksamen Emissionen miteinschließt. Da die Flüge seit diesem Jahr wie die DHL Transporte kompensiert werden, wurde das Herauslassen in Erwägung gezogen. Parallel ist die Vernachlässigung der anderen Wirkungskategorien in der LCI als verbesserungswürdig angemerkt worden. Dementsprechend werden die beiden beschriebenen Optionen nun näher beleuchtet, um zu untersuchen, ob die aktuelle Modellierung ausreicht. Um die Nicht-GWP-Emissionen auf irgendeine Weise einbeziehen zu können, wird auf den hinterlegten Flugprozess für Gütertransport zurückgegriffen. Dieser wird im Menü der Instanzeigenschaften so modifiziert, dass die CO₂-Emissionen mit dem Ergebnis der Atmosfair Berechnung nahezu übereinstimmen. Dahinter steht die Annahme, dass ein Transportflugzeug mit dem glei-

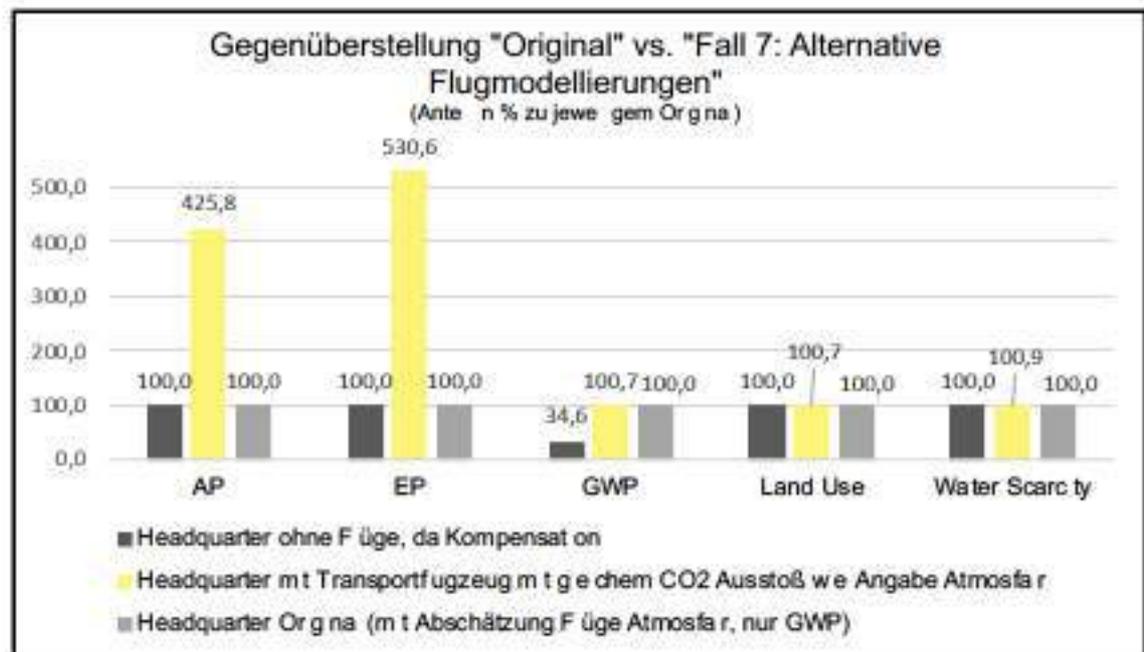


Abb. 29: Gegenüberstellung „Original“ vs. „Fall 7: Alternative Flugmodellierung“, Quelle: eigene Darstellung.

⁴⁰⁰ Vgl. Eurostat (2019); Institut National de la Statistique Tunisie (2016); Umweltbundesamt (2015). Siehe im elektronischen Anhang: „Prozessübersicht Modellierung.xls“, „Anhang LKW“.

chen CO₂-Ausstoß wie ein Personenflugzeug, ebenfalls vergleichbare Emissionen in den anderen Wirkungskategorien erzeugt, da der zugrundeliegende Prozess als nahezu deckungsgleich eingeschätzt wird. Erwartungsgemäß steigen die Emissionen im Bereich AP und EP deutlich an. In Bezug auf die Modellierung des Headquarters ist eine Steigerung von 325,8 % bzw. 430,6 % erkennbar (siehe Abb. 29). Diese eindeutig relevanten Auswirkungen wurden bisher unterschätzt und würden bei einem Ausklammern des Fluges aufgrund der CO₂-Kompensation weiterhin vernachlässigt. Zwar wirken sich die Emissionen auf der Gesamtebene kaum aus, trotzdem wird die ursprüngliche Modellierung an dieser Stelle erneut angepasst.⁴⁰¹

Zwischenfazit Sensitivitätsanalyse

Insgesamt zeigt die Sensitivitätsanalyse ein gemischtes Bild. Einige der aus der LCI und LCIA herausgefilterten Unsicherheiten und/ oder Auffälligkeiten zeigen nur einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Trotzdem konnte deren genauere Analyse die Qualität der Untersuchung weiter erhöhen. Die hohen Abweichungen in den Fällen 1-4 (siehe Abb. 30) sind auf die mangelnde Verfügbarkeit von Inventardaten bezüglich der Textilchemikalien zurückzuführen. Zwar existiert eine entsprechende Datenbankerweiterung von Thinkstep, diese ist in der zur Verfügung stehenden Lizenz jedoch nicht enthalten und ist darüber hinaus unvollständig. Sowohl für Natriumdithionit als auch für Etidronsäure wären passende Datensätze vorhanden, sodass hierdurch eine deutliche Verminderung der Ungenauigkeit erreicht werden könnte.

Fall	Maximale Abweichung Gesamtergebnis				
	AP	EP	GWP	Land Use	Water Scarcity
Fall 1: Energiebedarf Indigosynthese	-17,7 %	-6,9 %	-12,9 %	-0,5 %	-2,6 %
Fall 2: Natriumdithionit	-0,4 %	-0,3 %	-1,0 %	±0 %	±0 %
Fall 3: Etidronsäure	-19,4 %	-26,4 %	-21,8 %	-0,4 %	6,2 %
Fall 4: Natriumpersulfat	-9,9 %	-8,0 %	±0 %	±0 %	±0 %
Fall 5: Waschgewohnheiten	+64,6 %/ -15,5 %	+79,0 %/ -19,3 %	+94,2 %/ -22,9 %	+9,4 %/ -2,3 %	+136,1 %/ -33,0 %
Fall 6a: EoL Gutschriften	+1,4 %/ -3,1 %	+1,1 %/ -2,9 %	+0,8 %/ -2,4 %	+0,1 %/ -3,9 %	+0,1 %/ -1,9 %
Fall 6b: EoL Verteilung Verwertungsarten	2,5 %	6,0 %	0,8 %	0,2 %	-0,04 %
Fall 7a: DHL GoGreen	-0,7 %	-0,7 %	-0,7 %	-0,1 %	±0 %
Fall 7b: Emissionsklassen LKW	0,32 %	0,37 %	-0,005 %	±0 %	±0 %
Fall 7c: Flüge	0,29 %	0,28 %	+0,003 %/ -0,25 %	±0 %	±0 %

Abb. 30: Abweichungen im Gesamtergebnis gemäß Sensitivitätsanalyse, Quelle: eigene Darstellung.

⁴⁰¹ Siehe im elektronischen Anhang: „Auswertung Fall 7“, „Flüge“.

Da jedoch sowohl Indigo als auch Natriumpersulfat, sowie weitere verwendete Chemikalien nicht enthalten sind, deutet sich hier weiterer Forschungsbedarf an.

Die enormen Abweichungen in Fall 5 sowie die moderaten Unsicherheiten 6a und 6b sind auf unterschiedliche Gebrauchs- und Entsorgungsmuster zurückzuführen, zu denen verschiedenste, sich teilweise widersprechende Studien vorliegen. Auch diese hohe Variabilität wäre mit einem einheitlichen Leitfaden vermeidbar. Zu diesem Zweck wird aktuell unter der Schirmherrschaft der EU und der Sustainable Apparel Coalition (SAC) eine PCR für die Erstellung eines Environmental Footprints einer Hose bzw. Jeans erarbeitet, die jedoch aktuell noch nicht vorliegt.⁴⁰² Der geringen Variation in Fall 7 liegen Modellierungsdetails zugrunde, die jedoch aufgrund ihrer geringen Bedeutung an dieser Stelle keine methodischen Fragen aufwerfen.

Zudem lässt sich festhalten, dass die verwendete Strategie, im ersten Schritt immer jeweils die Variante mit den größten Umweltwirkungen zu wählen, um eine Unterschätzung zu verhindern, in der Praxis hilfreich scheint, jedoch im zweiten Schritt einer Überarbeitung bedarf, um das gegenteilige Extrem zu verhindern. Das beschriebene und angewandte schrittweise Vorgehen zur Modellierung fehlender Chemikalien ist außerdem grundsätzlich als Herangehensweise geeignet. Je weiter sich die Modellierung jedoch vom eigentlichen Prozess und vorhandenen Datensätzen entfernt, desto unsicherer ist das Resultat.

Das im vorliegenden Abschnitt intensiv diskutierte Optimierungspotential wird im folgenden Kapitel in das ursprüngliche Modell übertragen, sodass hieraus Schlussfolgerungen zur Beantwortung der Forschungsfragen abgeleitet werden können.

⁴⁰² Vgl. Europäische Kommission (2019).

5.4.2 Abschließendes Ergebnis

Gemäß des überarbeiteten Modells liegen die ökologischen Hotspots im Lebenszyklus einer MAIRAA Jeans, in Bezug auf die Versauerung, Eutrophierung und Wasserverknappung im Baumwollanbau, der Webereivorbereitung, der Fertigung und Veredelung, sowie in der Gebrauchsphase. Die Abb. 31 zeigt hierzu jeweils den Gesamtbetrag und die prozentuale Verteilung über alle Lebenszyklusabschnitte hinweg.

	Gesamt (absolut)	Baumwollanbau	Spinnerei	Webereivorbereitung	Weberei	Fertigung & Veredelung	Vertrieb	Distribution	Gebrauch	End-of-Life	Transporte
AP	0,04	10,3 %	1,1 %	28,7 %	0,3 %	35,1 %	1,5 %	0,6 %	25,9 %	-6,3 %	4,5 %
EP	0,01	23,8 %	1 %	14,1 %	0,9 %	26,3 %	1,9 %	0,5 %	34,6 %	-5,5 %	3,5 %
GWP	15,81	-2,5 %	4,8 %	23,8 %	3,9 %	31 %	0 %	0,5 %	35,7 %	1,4 %	1,9 %
Land Use	2.034	96 %	0 %	0,4 %	-0,1 %	4,5 %	0,4 %	0 %	2,7 %	-4,2 %	0,2 %
Water Scarcity	23,67	23,1 %	0,2 %	3,9 %	0,3 %	28,1 %	0,2 %	0,1 %	46 %	-2 %	0 %

Abb. 31: Darstellung Endergebnis, Quelle: eigene Darstellung.

Während der Produktlebenszeit der untersuchten Jeans werden 15,81 kg CO₂-Äquivalent ausgestoßen. Die Schwerpunkte liegen dabei in der Webereivorbereitung, der Fertigung und Veredelung und dem Gebrauch. Die Intensität dieser Ausprägungen sollte, aufgrund der in der Sensitivitätsanalyse herausgearbeiteten Schwankungsbreiten (siehe Abb. 30), mit entsprechender Vorsicht interpretiert werden. Bei jenen Aspekten die eine intensive Umweltwirkung vorweisen, ist gleichzeitig die ermittelte Variabilität am höchsten. Der benötigte Flächenbedarf lässt sich fast ausschließlich auf die Fasergewinnung durch den Baumwollanbau zurückführen.

Diese Schwerpunkte haben sich im Vergleich zur ursprünglichen Modellierung nicht verändert, auch wenn die jeweiligen Prozentanteile leicht abweichen. Die Begründung hierfür wurde in den vorangegangenen Kapiteln bereits intensiv besprochen und wird dementsprechend nicht wiederholt. Weitere Darstellungen des Endergebnisses sind in Anhang 4 zu finden.

5.4.4 Interpretation Produktsystem

In der folgenden Interpretation werden aus den zuvor erläuterten Untersuchungsergebnissen Handlungsmöglichkeiten für AA abgeleitet, indem die identifizierten Hotspots mit den aktuell eingesetzten Methoden und Empfehlungen der Literatur zur Verbesserung der ökologischen Performance abgeglichen werden. Zudem wird eingeschätzt inwieweit eine Veränderung im Einflussbereich von AA liegt, um die Realisationsmöglichkeiten treffend bewerten zu können. Insofern die empfohlenen nächsten Schritte mit Hilfe des aktuelle Modells abgeschätzt werden können, wird eine erste Einschätzung hierzu gegeben.

Abb. 32 zeigt zu diesem Zweck eine tabellarische Übersicht der Verbesserungspotentiale und Handlungsmöglichkeiten von AA, die im Folgenden näher erläutert werden.

Lebenszyklusabschnitt	Hotspot	Eingesetzte Technik	Ökologische Empfehlungen Literatur	Verbesserungspotential	Einflussmöglichkeit AA	Handlungsmöglichkeiten AA
	Anteil >10%	siehe 4.1.3	siehe 2.2	Vergleich C und D	niedrig- mittel- hoch	erste Schritte
Baumwollanbau	Düngemittel (AP, EP), Wasser- & Flächenverbrauch	100 % CO aus kbA	100 % CO aus kbA, Fasermischungen, moderne Landwirtschaftsmethoden	niedrig	mittel	Einfluss Fasermischungen genauer untersuchen.
Webereivorbereitung	Strombedarf Indigoproduktion	Unter GOTS zugelassener Indigo aus China	Dystar Indigo Vat. 40% Lösung, Advanced Denim by Archroma, Dry-Indigo by Tejidos Royo	mittel	hoch	Umweltwirkungen Indigo genauer untersuchen, um Vergleiche zu anderen Methoden ziehen zu können.
Fertigung und Veredelung	Verbrauch von Lösemitteln bei Chemikalienherstellung und Stromverbrauch DA	Unter GOTS zugelassene Bleichmittel, tunesischer Strommix	Enzymwäsche, ersetzen von Bimssteinen durch Kunststoff oder Silizium, Laser Ozon	mittel	mittel	Chemikalienherstellung genauer analysieren, Energiehotspots, Potential erneuerbare Energien.
Gebrauchsphase	Aufsummierter Strom & Wasserverbrauch	nicht im Ermessen von AA	Seltener Waschen, Energie- und Wassersparende Technologien	unbekannt	niedrig	Endkunden für eigenen Einfluss sensibilisieren.

Abb. 32: Hotspotanalyse & Verbesserungsvorschläge; Quelle: eigene Darstellung, in Anlehnung an Schrott, W./ Paul, R. (2015), S. 568 ff.; Pal, H./ et. al. (2017), S. 117 ff.; Tejidos Royo S. L. (2018), S. 19; Dystar Singapore Pte. Ltd. (2019), S. 26; Archroma Management GmbH (o.J.), S. 2.

Da AA bereits ausschließlich Baumwolle aus kontrolliert biologischem Anbau verwendet, was in der Literatur u. a. als ökologische Alternative benannt ist, wird das Verbesserungspotential als gering eingeschätzt.⁴⁰³ Da die Biobaumwolle des Untersuchungsobjekts aus der Türkei stammt, wo der Anbau aus industrialisierter Landwirtschaft stammt, kann ebenfalls von modernen Bewässerungsmethoden ausgegangen werden.⁴⁰⁴ Zudem arbeitet AA in einigen Jeans-Modellen bereits mit der Beimi-

⁴⁰³ Vgl. Paul, R. (2015), S. 2; McLoughlin, J./ et. al. (2015), S. 32, 34; Pal, H./ et. al. (2017), S. 117 f.

⁴⁰⁴ Vgl. Textile Exchange (2016), S. 58.

schung nachhaltiger Faseralternativen wie Tencel™ Lyocell.⁴⁰⁵ Wird der Verbesserungsansatz der Fasermischungen auf das vorliegende Modell übertragen, ergeben sich bei einem Verhältnis von 50 % Baumwolle und 50 % Leinen besonders in den Wirkungskategorien „Land Use“ und „Water Scarcity“ deutliche Verbesserungen

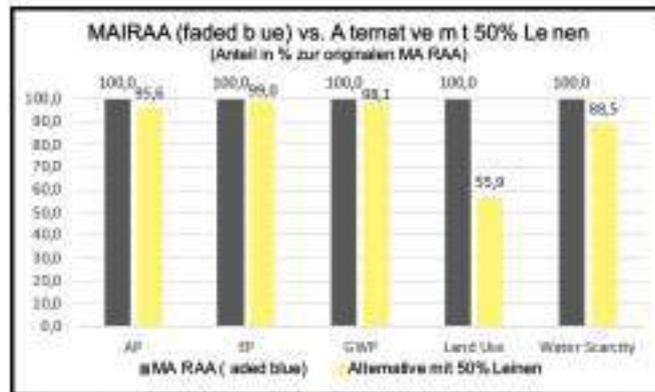


Abb. 33: Gegenüberstellung MAIRAA (faded blue) vs. „Alternative mit 50% Leinen“, Quelle: eigene Darstellung

der Umweltwirkungen (siehe Abb. 33). Da der Einfluss des Baumwollanbaus gerade beim Thema Landnutzung mit einem Anteil von 96 % des Gesamtbedarfs großen Einfluss auf das Ergebnis hat, ist eine Reduktion hierbei von großer Bedeutung.⁴⁰⁶ Die beispielhaft betrachtete Fasermischung bestätigt das in der Literatur beschriebene

Verbesserungspotential am Beispiel des eigenen Untersuchungsgegenstands. Daraus leitet sich einerseits weiteres Forschungspotential ab, in der die verschiedenen Einflüsse unterschiedlicher Fasermischungen analysiert werden könnten. Andererseits kann dies von AA als Bestätigung der aktuellen Strategie, mit alternativen Fasermischungen zu experimentieren, verstanden werden.

Um qualifizierte Handlungsempfehlungen für den Hotspot in der Webereivorbereitung (Indigoproduktion) geben zu können, müssen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zunächst einer weiteren Prüfung unterzogen werden und die Umweltwirkungen der Farbstoffsynthese in einer eigenen Ökobilanzstudie beleuchtet werden. Daraufhin können die Verbesserungspotentiale etwaiger Alternativen bewertet werden. Da AA aktuell bereits fast alle in der Literatur genannten ökologischen Alternativen einsetzt oder in Pilotprojekten testet, erscheint eine Evaluation dessen durch die vorgeschlagene weiterführende Untersuchung sinnvoll.⁴⁰⁷

Die Situation in der Fertigung und Veredelung wird ähnlich interpretiert. Bevor aus den Umweltwirkungen der Bleichmittel Rückschlüsse abgeleitet und Handlungsempfehlungen gegeben werden können, besteht weiterer Forschungsbedarf. Zwar wurde das Modell im Rahmen der Sensitivitätsanalyse weiter verbessert, trotzdem erscheint der prägende Einfluss der beinhaltenen Etidronsäure auf das Gesamtergebnis weiterhin fraglich. Zum besseren Verständnis der Umweltwirkungen durch die Stromerzeugung sollte der Energiebedarf in Zusammenarbeit mit Denim Authority genauer analysiert werden. Laut der bereitgestellten Übersicht des Produzenten liegen die Schwerpunkte

⁴⁰⁵ Vgl. Social Fashion Company GmbH (o.J).

⁴⁰⁶ Siehe Abb. bei abschließendes Ergebnis. Siehe im elektronischen Anhang: „Auswertung Szenario 1: 50% Leinen“.

⁴⁰⁷ Vgl. Muth, L. (2020).

des Energieverbrauchs in der Druckluftherzeugung, sowie in den Abteilungen Waschen und Trocknen.⁴⁰⁸ Da die energiebezogenen Daten jedoch nicht für das spezifische Modell ermittelt werden konnten und auf dem umgelegten Gesamtbedarf der Produktionsstätte basieren, könnte eine weiterführende Analyse auch hier zusätzliche Entscheidungshilfen für bestimmte Verfahren generieren. Eine weitere denkbare Option wäre die Umstellung der Fabrik auf erneuerbare Energien, um die Umweltwirkung des verbrauchten Stroms zu senken. Hierdurch könnten die klimawirksamen Gesamtemissionen des Produkts sofort um 8,2 % gesenkt werden. Somit könnten allein bei der jährlichen Jeansproduktion für AA 102 t CO₂-Äquivalent eingespart werden.⁴⁰⁹ Dieses Potential sollte

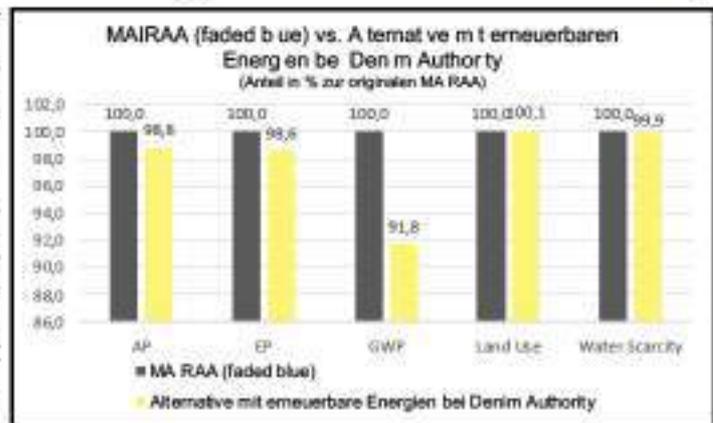


Abb. 34: Gegenüberstellung MAIRAA (faded blue) vs. „Alternative mit erneuerbaren Energien bei Denim Authority“, Quelle: eigene Darstellung.

durch AA an Denim Authority kommuniziert werden, um etwaige Möglichkeiten zur Nutzung erneuerbarer Energien gemeinsam zu erörtern.

Das ökologische Einflusspotential der Gebrauchsphase wurde in Abschnitt 5.4.1 *Interpretation Produktsystem* unter Fall 5 bereits ausführlich erläutert. Demnach liegt die Schwankungsbreite und damit der Einfluss des Konsumenten auf die Ergebnisse der Ökobilanz teilweise bei über 150 %. Die Möglichkeiten für AA sind hierbei naturgemäß begrenzt, da die Prozesse nach dem Kauf stattfinden und damit außerhalb des Kontrollbereichs des Unternehmens liegen. Durch gezielte Kommunikationsmaßnahmen können Kunden für das Thema Waschen und Pflege sensibilisiert und eine Verhaltensänderung initiiert werden. Ein weiterer Aspekt, der den Einfluss dieses Lebenszyklusabschnitts noch erhöht und in der Ökobilanz nicht mit berücksichtigt werden konnte, ist die verlängerter Haltbarkeit von Jeans bei richtiger Pflege. Da AA diese Thematik ebenfalls bereits bewusst ist, wird aktuell ein Care-Guide erarbeitet, der über verschiedene Kanäle an den Kunden kommuniziert werden soll, um Aufmerksamkeit für die Umweltauswirkungen der Gebrauchsphase zu schaffen. Die gewonnenen Daten der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit können hier mit einfließen, um die Dringlichkeit einer bewussten Bekleidungspflege zu untermauern.

Für die in der Zielsetzung vorgesehene Kommunikation der Endergebnisse an den Konsumenten zwecks Marketing, besteht die Herausforderung in der limitierten Vergleichbarkeit von Ökobilanzen. Ohne eine direkte Bezugsgröße oder den Vergleich zu

⁴⁰⁸ Vgl. Denim Authority (2020a).

⁴⁰⁹ Siehe „Auswertung Szenario 2 EE DA“

einem Referenzprodukt werden die hier erhobenen Daten dem durchschnittlichen Endkunden keinen hilfreichen Informationsmehrwert bieten. In der Analyse von bestehenden Ökobilanzen von Jeansprodukten in Kapitel 4.3 *Jeans Produkt* sind die beachtlichen Unterschiede der Analysen dargestellt. Neben verschiedenen Softwareprogrammen und unterschiedlichen Abschneidekriterien, sind die abweichende Strategie der Datenerhebung und die Annahmen der Nutzungsphase entscheidend für die Abweichungen.⁴¹⁰ Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse unterstreicht die Bedeutung der Annahmen zu Wasch- und Trockenverhalten während der Nutzung zusätzlich. Durch die Variation der Waschintervalle zwischen „1x Tragen, 1x Waschen“ und „10x Tragen, 1x Waschen“ entstehen Schwankungen im GWP-Endergebnis von 117,1 %. Die Annahmen der vorhandenen Studien bewegen sich hierbei zwischen keiner Wäsche (Cradle-to-Gate Betrachtung) und 20 bis 102 Wäschen über die Nutzungsdauer. Dementsprechend variieren deren Ergebnisse zwischen 8,8 kg und 33,4 kg CO₂-Äquivalent.⁴¹¹

Da die Studien keine ausreichenden gemeinsamen Rahmenbedingungen vorweisen und diese nur bedingt aneinander angeglichen werden können, wird in der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit auf einen Vergleich verzichtet. Die Entscheidung über eine vergleichende Kommunikation ohne wissenschaftliche Basis liegt bei AA. Sollte dies gewünscht sein, wird empfohlen das Modell dieser Arbeit weitestgehend an die Annahmen der herangezogenen Studien anzupassen, um zumindest eine annähernde Vergleichbarkeit herzustellen. Beispielsweise könnte die Waschhäufigkeit von *Hedman, E. und Roos, S./ et. al.* mit einem Intervall von jedem 10. Mal tragen, in die AA-Studie übertragen werden.⁴¹² Auf diese Weise würde für die MAIRAA Jeans ein Vergleichswert von 13,04 kg CO₂-Äquivalent errechnet, der somit nahezu im Durchschnitt (bei 12,9 kg CO₂-Äquivalent) der Ergebnisse der Vergleichsstudien anderer nachhaltiger Jeans läge.⁴¹³ Diese Aussage ist maximal als Orientierungswert einzuordnen und entspricht ausdrücklich nicht den wissenschaftlichen Gütekriterien der vorliegenden Arbeit. Da das primäre Ziel dieser Ausarbeitung jedoch in der Datenbeschaffung für Kommunikationszwecke liegt, wurde der Wert, wenn auch nur zur groben Abschätzung, mit aufgenommen.

Im anschließenden Fazit werden die zentralen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit abschließend zusammengefasst, bereits aufgezeigte Limitationen werden zusammengetragen und ein Forschungsausblick wird aufgezeigt.

⁴¹⁰ Siehe 4.3 *Jeans Produkt*.

⁴¹¹ Siehe Excel „Übersicht Studien“ Blatt „Ergebnisse Überblick“

⁴¹² Siehe Excel „Modellierung Sensitivitätsanalyse“, Blatt „Fall 5: Waschgewohnheiten 2“.

⁴¹³ Siehe Excel „Übersicht Studien“ Blatt „Ergebnisse Überblick“ sowie „Auswertung FINAL vs. FINAL mit alle 10x waschen für Vergleich“

6. Fazit

Das vorrangige Ziel der vorliegenden Ökobilanzstudie besteht in der Ermittlung von produktbezogenen Umweltkennzahlen für den Untersuchungsgegenstand Jeans, an einem Beispielmotell der Modemarke AA. Die gewonnenen Daten werden vorwiegend aus Marketinggründen erhoben, um den USP des Unternehmens, die ökologisch und sozial verträgliche Produktherstellung, zahlenbasiert klarer an den Endkunden kommunizieren zu können. Der zweite Teil der Zielformulierung beinhaltet die Analyse von ökologischen Hotspots innerhalb des Lebenszyklus, um weiteres Produktoptimierungspotential aufzudecken. Ein zusätzliches Anliegen besteht in der Untersuchung der Gebrauchsphase, um den Einfluss des Kunden auf die Produktökologie benennen und kommunizieren zu können, um Endverbraucher hierfür zunehmend zu sensibilisieren.

Zur Einführung in das zu untersuchende Produktsystem wurde die Jeansproduktion, mit besonderem Fokus auf die damit einhergehenden ökologischen Folgen, beschrieben, um zunächst ein Grundverständnis der zugrundeliegenden Problematik zu schaffen. Daraufhin wurde die normgerechte Vorgehensweise der Ökobilanzierung beleuchtet, um die angewandte Methodik zu erläutern. In Kapitel 4 folgt die Gegenüberstellung bestehender Ökobilanzen, die auf verschiedenen Betrachtungsebenen einen Bezug zum untersuchten Produktsystem vorweisen. Die Absicht lag dabei in der Ermittlung von Vergleichsgrößen, um die Ergebnisse der eigenen Analyse relativ beurteilen und kommunizieren zu können. Diese Zielsetzung musste jedoch aufgrund der breiten Unterschiede in den zugrundeliegenden Annahmen der untersuchten Studien verworfen werden.

Nach diesem einleitenden Theorieteil folgt die eigene Ökobilanzierung, in der zunächst alle getroffenen Annahmen, die Zielsetzung und die methodischen Rahmenbedingungen beschrieben sind. In der anschließenden Inventarmodellierung ist das schrittweise Vorgehen der Modellerstellung detailliert dokumentiert, um die Nachvollziehbarkeit der Studie sicherzustellen. Dabei wurde auf Unsicherheiten bestimmter Annahmen verwiesen, die im weiteren Verlauf der Arbeit überprüft werden. Zunächst folgt jedoch die Inventaranalyse, in der die Ergebnisse der Inventarmodellierung den ausgewählten Wirkungskategorien AP, EP, GWP, Land Use und Water Scarcity zugeordnet und entsprechend hinterlegter Charakterisierungsfaktoren auf einen gemeinsamen Nenner gebracht werden. Bei der Analyse dieser vorläufigen Ergebnisse ergaben sich in den Lebenszyklusabschnitten Webereivorbereitung, Fertigung und Veredelung sowie in der Gebrauchs- und Entsorgungsphase modellbedingte Auffälligkeiten, die zusammen mit den angemerkten Unsicherheiten der Inventarmodellierung, in der Sensitivitätsanalyse kritisch beleuchtet wurden. Dafür wurden sieben Fälle abgeleitet, deren Annahmen variiert wurden, um deren Auswirkung auf das Gesamtergebnis verstehen und

beurteilen zu können. Dabei ergab sich, dass die festgestellten signifikanten Abweichungen einerseits in der mangelhaften Modellierungsgrundlage von Textilchemikalien begründet sind und andererseits auf die Variationsmöglichkeiten der Gebrauchs- und Entsorgungsphase zurückzuführen sind, auf die das Unternehmen nur geringen Einfluss hat. Parallel wurden hieraus Verbesserungsmöglichkeiten für das Ursprungsmodell abgeleitet, die anschließend übernommen wurden, um das korrigierte Ergebnis zu erhalten.

Was die ökologischen Hotspots in den Wirkungskategorien der Versauerung, Eutrophierung und Wasserverknappung anbelangt, konnte anhand der Untersuchung ermittelt werden, dass deren Gesamtergebnis durch den Anteil des Baumwollanbaus, der Webereivorbereitung, der Fertigung und Veredelung, sowie in der Gebrauchsphase dominiert wird. Andererseits konnte festgestellt werden, dass der Flächenbedarf fast vollständig auf den Baumwollanbau zurückzuführen ist. Die klimawirksamen Emissionen in einer Höhe von 15,81 kg CO₂-Äquivalent werden hingegen vorwiegend in der Webereivorbereitung, der Fertigung und Veredelung sowie in der Gebrauchsphase erzeugt. Zwar kann hieraus auf eine entscheidende Bedeutung der insgesamt vier genannten Lebenszyklusabschnitte geschlossen werden, das Ausmaß dessen gilt jedoch nur unter Einschränkung, da sich die in der Sensitivitätsanalyse ermittelten Schwankungen bei diesen Punkten am stärksten auswirken.

An dieser Stelle werden die Limitationen der vorliegenden wissenschaftlichen Ausarbeitung klar erkennbar. Wie bereits kurz angeschnitten liegen diese in der begrenzten Verfügbarkeit von Informationen zur Modellierung von fehlenden chemikalienbezogenen Datenbankprozessen. Einerseits waren Datensätze der Datenbankerweiterung für textile Veredelungsprozesse („Extension database XV: Textile finishing“) im Rahmen der verfügbaren Softwarelizenz nicht enthalten, andererseits inkludiert diese Ergänzung nicht alle fehlenden Chemikalien, sodass hier weiterer Forschungsbedarf besteht.⁴¹⁴ Unter Anderem sind die beiden verwendeten Farbstoffe hier nicht aufgeführt. Eine Barriere zur detaillierteren Modellierung dieser Prozesse besteht in der Geheimhaltung der genauen chemischen Zusammensetzung der Substanzen und der angewandten Verfahrenstechnik. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden diese Produkte bestmöglich abgeschätzt, die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen jedoch die Anfälligkeit dieser Prozesse auf Veränderungen der zugrunde gelegten Annahmen und beschränken somit die Aussagefähigkeit der Ergebnisse.

Der zweite identifizierte limitierende Aspekt besteht in der aktuell noch unzureichenden Standardisierung von Ökobilanzen über Hosen bzw. Jeans, die fundierte Vergleiche erleichtern würde. Die erwähnte PCR eines T-Shirt erfüllt diese Anforderung für die entsprechende Produktgruppe, sodass sich die, aktuell in der Entwicklung befindliche, PCR für Hosen, voraussichtlich zu einer nachträglichen Überarbeitung des vorliegen-

⁴¹⁴ Vgl. Thinkstep GmbH (o.J.d).

den Ergebnisses eignet. So könnte eine qualitativ hochwertige vergleichende Aussage zu einem späteren Zeitpunkt noch ergänzt werden. Sollte AA trotzdem vorher eine solche Botschaft kommunizieren wollen, sollte dies ausschließlich unter Vorbehalt und mit entsprechenden Einschränkungen stattfinden, um die Reputation des Unternehmens nicht aufgrund einer ungesicherten Aussage zu gefährden. Statt eines Vergleichs mit einem anderen Jeansprodukt könnten andere Güter oder Dienstleistungen als Maßstab herangezogen werden, um die Daten für den Endkonsumenten zu veranschaulichen.

Die bedeutende Einflussmöglichkeit des Kundenverhaltens auf die Produktökologie wurde erwartungsgemäß durch die Untersuchung bestätigt und kann somit entsprechend der Zielsetzung kommuniziert werden.

Darüber hinaus konnte in der Evaluierung der vorgestellten Handlungsoptionen festgestellt werden, dass eine Variation von Fasermischungen, z.B von der Biobaumwolle mit Leinen, das Potential birgt, den ermittelten Hotspot der Rohstoffgewinnung in den Bereichen der Wasserverknappung und des Flächenbedarfs deutlich zu reduzieren. Um die umweltrelevante Bedeutung der Fertigung und Veredelung zu vermindern würde sich ein Umstieg auf erneuerbare Energien eignen, um die klimawirksamen Gesamtemissionen des Untersuchungsgegenstands um 8,2 % zu senken.

Auch wenn die Zielsetzung vorerst nur eingeschränkt erreicht wurde, zeigt die vorliegende Arbeit das praktische Anwendungspotential der Ökobilanzierung als Entscheidungsunterstützung auf. Sollte das Projekt im Unternehmen weitergeführt werden, könnte das Modell zunächst mit den Informationen der textilen Datenbankerweiterung optimiert und im nächsten Schritt auf weitere Produkte aus dem gleichen Gewebe sowie einer übereinstimmenden Supply Chain adaptiert werden. Langfristig ist ebenfalls eine Übertragung der Methode auf weitere Produktgruppen denkbar, um die Umweltwirkungen aller produzierten Kleidungsstücke schrittweise zu erfassen und deren fundiert belegten ökologischen Vorteile glaubwürdig kommunizieren zu können.

Quellenverzeichnis

- Abfallwirtschaftsbetriebe Köln GmbH (o.J.): Standortverzeichnis, verfügbar unter: <https://www.altkleiderkoeln.de/standortverzeichnis/ergebnisse.html>, Zugriff am: 14.02.2020.
- Air Products GmbH (o.J.): Cryo-Condap®-Technologie, verfügbar unter: <http://www.airproducts.de/~media/downloads/c/cryo-condap-system-for-solvent-condensation/data-sheets/de-de-cryo-condap-technology-datasheet.pdf?industryItem=Home%20Root&subIndustryItem=Industries&segment=PharmaceuticalsBiotech&applicationChildItem=pharma-applications&productLevel3=Cryo-Condap-system-for-solvent-condensation>, Zugriff am: 26.02.2020.
- Aitex Textile Research Institute (2019) Certificate eco-technology, No. 2019A-P0053, Alcoy.
- Alriksson, B./ et. al. (2009): Cellulase Production from Spent Lignocellulose Hydrolysates by Recombinant *Aspergillus niger*, in: Applied and Environmental Microbiology, Vol. 75, No.8, S. 2366-2374.
- Amutha, K. (2017): Environmental impacts of denim, in: Muthu, S., Sustainability in Denim, Oxford, S. 27-48.
- Archroma Management GmbH (o.J.): Dyeing, a universe of color effects, far beyond indigo, verfügbar unter: <https://www.archroma.com/solutions/coloration-denim-casual-wear>, Zugriff am: 11.01.2020.
- Atmosfair gGmbH (o.J.a): Ergebnisse Emissionsberechnung, verfügbar unter: <https://co2offset.atmosfair.de/co2offset?p=1#/flightResults/1005125837>, Zugriff am: 22.02.2020.
- Atmosfair gGmbH (o.J.b): Klimawirkung des Flugverkehrs, verfügbar unter: https://www.atmosfair.de/de/fliegen_und_klima/flugverkehr_und_klima/klimawirkung_flugverkehr/, Zugriff am: 16.02.2020.
- Baker, I. (2018): Fifty Materials that make the World, Basel.
- Barbera, J./ et. al. (2012): Sulfites, Thiosulfates, and Dithionites, in: Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. 34, Weinheim.
- Bopst, J./ et. al. (2019): Umweltschonender Luftverkehr, lokal, national, international, Texte 130/ 2019, Dessau-Roßlau.
- Brommer, E./ Manhart, A. (2013): Dampfbügeleisen, Entwicklung der Vergabekriterien für ein Klimaschutzbezogenes Umweltzeichen, Studie im Rahmen des Projekts „Top 100 – Umweltzeichen für klima- relevante Produkte“, Freiburg.

- C&A Foundation (2018): Environment, Social & Economic Impact Assessment of three cotton cultivation systems-BCI, Conventional & Organic Cotton, Zug.
- Capello, C./ et. al. (2005): Life-Cycle Inventory of Waste Solvent Distillation: Statistical Analysis of Empirical Data, in: Environmental Science & Technology, Vol. 39, No. 15, S. 5885-5892.
- Cargill, Incorporated. (o.J.): ChemCure® Amidoamines, verfügbar unter: <https://www.cargill.com/bioindustrial/chem-cure-amidoamines>, Zugriff am: 20.02.2020.
- Chavan, R. B. (2015): Indigo dye and reduction techniques, in: Paul, R., Denim, Manufacture, Finishing and Applications, Cambridge, S. 37-67.
- Dahlbo, H. (2016): Increasing textile circulation—Consequences and requirements, in: Sustainable Production and Consumption, 2016.
- Dahllöf, L. (2004): Life Cycle Assessment (LCA) applied in the Textile Sector: the Usefulness, Limitations and Methodological Problems – A literature Review, Göteborg.
- Daimler AG (2018): Umweltzertifikat Mercedes-Benz A-Klasse, verfügbar unter: <https://www.daimler.com/dokumente/nachhaltigkeit/produkt/daimler-umweltzertifikat-mb-a-klasse.pdf>, Zugriff am: 14.02.2020.
- Dearborn, R. J. (1968): U.S. Patent 3,375,245, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Denim Authority S.A. (2019a) Rohdaten Denim Authority Data collection sheet.xlsx, verfügbar im elektronischen Anhang.
- Denim Authority S.A. (2020a): Electricity, heat, steam and water used per department, Mail vom 03.02.2020, verfügbar im elektronischen Anhang.
- Denim Authority S.A. (2020b): CHEMICAL used for MAIRAA, Mail vom 03.02.2020, verfügbar im elektronischen Anhang.
- Denim Authority S.A. (2020c): Materials used for MAIRAA, Mail vom 03.02.2020, verfügbar im elektronischen Anhang.
- Denim Authority S.A. (2020d): Quantity of chemicals used for MAIRAA, Mail vom 03.02.2020, verfügbar im elektronischen Anhang.
- Deutsche Post DHL Group (2019): Daten & Fakten 2019, Nachhaltige Informationen über Deutsche Post DHL Group, Bonn.
- Deutsches Lackinstitut (2003): 28 Lacke und Farben, in: Informationsserie des Fonds der chemischen Industrie, Frankfurt.

DHL Paket GmbH	(o.J.): Umweltfreundlich versenden und empfangen mit DHL, verfügbar unter: https://www.dhl.de/de/privatkunden/kampagnenseiten/dhl-nachhaltigkeit.html , 02.02.2020.
DIN EN 15804:2014-07	(2014): Nachhaltigkeit von Bauwerken, Umweltproduktdeklarationen, Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, EN 15804:2012+A1:2013.
DIN EN ISO 14040: 2009-11	(2009): Umweltmanagement, Ökobilanz, Grundsätze und Rahmenbedingungen, ISO 14040:2006.
DIN EN ISO 14044:2018-05	(2018): Umweltmanagement, Ökobilanz, Anforderungen und Anleitungen, ISO 14044:2006 + Amd 1:2017.
DIN EN ISO 14050:2010-08	(2010):Umweltmanagement – Begriffe, ISO 14050:2009.
Doering, E./ et. al.	(2012): Grundlagen der Technischen Thermodynamik, Lehrbuch für Studierende der Ingenieurwissenschaften, Auflage 7, Wiesbaden.
Dorow, L.	(2020): Microsoft Teams Nachricht von Dorow, L., Verantwortliche für Logistik bei AA, verfügbar im elektronischen Anhang.
Douglas, T./ Dever, J.	(1954): Anhydrous Sodium Hydroxide, The Heat Content From 0° to 700° C, the Transition Temperature, and the Melting Point, in: Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 53, No.2.
DyStar Colours Distribution GmbH	(2019): Insight Denim - DyStar Indigo Vat 40% Sol., Ludwigshafen.
Elghali, L./ et. al.	(2007): Developing a sustainability framework for the assessment of bioenergy systems, in: Energy Policy Vol. 35, S. 6075–6083
Elkoplast CZ, s.r.o.	(o.J): Altkleidercontainer, verfügbar unter: https://www.elkoplast-cz.de/media/files/catalog/item/files-178/Textiln%C3%AD%20kont%20v02%201804%20(DE)%20kk.pdf ; Zugriff am: 15.02.2020.
Ellilä, S./ et.al.	(2017): Development of a low-cost cellulase production process using Trichoderma reesei for Brazilian biorefineries, in: Biotechnology for Biofuels, 10:30.
EPD International AB	(2019): Product Category Rules, Trousers, Shorts and Slacks and similar Garments, Stockholm.

- EPD International AB (2015): General Programme Instructions for the International EPD® System, Version 2.5, Stockholm.
- Epochemie International Pte Ltd. (o.J.): AMIDOAMINES, verfügbar unter: <http://www.epochemie.com/products/amidoamines/>, Zugriff am: 20.02.2020.
- Europäische Kommission (2019): The environmental footprint transition phase, Brüssel.
- Eurostat (2019): Lorries and road tractors, by age [road_eqs_lorrea], verfügbar unter: https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=road_eqs_lorrea&lang=en, Zugriff am: 03.01.2020.
- Farrant, L./ Olsen, I./ Wangel/ A. (2010): Environmental benefits from reusing clothes, in: International Journal of Lifecycle Assessment, Vol. 15; S. 726-736.
- Fazio, S./ et. al. (2018): Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods, Brüssel.
- Ferrigno, S./ Guagagnini, R./ Tyrell, K. (2017): Is cotton conquering its chemical addiction? A review of pesticide use in global cotton production, Brighton.
- Fine Organics Industries Ltd. (o.J.) Finafinish-GF40, verfügbar unter: <https://www.fineorganics.com/additives-for-textiles/finishing-softener-polyethylene-emulsion/finafinish-gf-40>, Zugriff am: 28.11.2019.
- Flach, D./ Garver, R. (1959): U.S. Patent 2,899,272, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Franken, N. (2018): CSR in der Kleidungsindustrie, aus Verbrauchersicht, in: Heinrich, P., CSR und Fashion, nachhaltiges Management in der Bekleidungs- und Textilbranche, Berlin, S. 133-154.
- Fransen, C. W./ van Kampen, D.M. (1972): U.S. Patent 3,657,146, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Garcia, B. (2015): Reduced water washing of denim garments, in: Muthu, S., Sustainability in Denim, Oxford, S. 405-423.
- Gooch, J. W. (2007): Cellulose, in: Encyclopedic Dictionary of Polymers. Springer, New York.

- Google Maps (o.J.a): Orta Anadolu Bez Fabrikasi nach Port of Mersin, Türkei, verfügbar unter: <https://www.google.de/maps/dir/Osman+Kavuncu,+Orta+Anadolu+Bez+Fabrikasi,+Melikgazi%2F-Kayseri,+Türkei/Port+of+Mersin,+Türkei/@37.7645814,33.5942033,8z/data=!3m1!4b1!4m13!4m12!1m5!1m1!1s0x152b0e1f156bb17b:0xa7438ce77b4b9ea6!2m2!1d35.4577471!2d38.72112!1m5!1m1!1s0x1527f25439ec7fc3:0xdfa295a0fc7dd5c2!2m2!1d34.6458333!2d36.7975>, Zugriff am: 12.02.2020.
- Google Maps (o.J.b) : old port of tunis nach Ras Jebel DA, verfügbar unter: <https://www.google.de/maps/dir/old+port+of+tunis,+Ave+Dag+Hammarskjoeld,+Tunis,+Tunesien/شارع+البينة,+Ras+Jebel,+Tunesien%E2%80%AD/@37.000201,9.8743342,10z/data=!3m1!4b1!4m13!4m12!1m5!1m1!1s0x12fd346a6d3a0db7:0x88e91e3de7118fef!2m2!1d10.1919245!2d36.798894!1m5!1m1!1s0x12e2c278b6cf7659:0xe2b4c1f28d93ce93!2m2!1d10.1297298!2d37.2026352>, Zugriff am: 12.02.2020.
- Google Maps (o.J.c): Port Authority of Genoa nach LOXXESS AG, Steinauer Weg, Aurach, verfügbar unter: <https://www.google.de/maps/dir/Port+Authority+of+Genoa,+Palazzo+San+Giorgio,+Via+della+Mercanzia,+2,+16124+Genova+GE,+Italien/Steinauer+Weg,+91589+Aurach/@46.8084053,7.1789616,7z/data=!3m1!4b1!4m13!4m12!1m5!1m1!1s0x12d34168391348a7:0x5702dc65b219f69c!2m2!1d8.928717!2d44.409167!1m5!1m1!1s0x4798bfb723c0ea39:0xde84b3e791e597a8!2m2!1d10.4267423!2d49.2532348>, Zugriff am: 12.02.2020.
- Google Maps (o.J.d): Frankfurt am Main nach LOXXESS AG, Aurach, verfügbar unter: <https://www.google.de/maps/dir/Frankfurt+am+Main/LOXXESS+AG,+Steinauer+Weg,+Aurach/@49.628813,8.3662167,8z/data=!3m1!4b1!4m13!4m12!1m5!1m1!1s0x47bd096f477096c5:0x422435029b0c600!2m2!1d8.6821267!2d50.1109221!1m5!1m1!1s0x4798bfb6329db8d7:0x4e9faee34949c7c2!2m2!1d10.42285!2d49.25363>, Zugriff am: 14.02.2020.
- Google Maps (o.J.e): Berlin nach LOXXESS AG, Aurach, verfügbar unter: <https://www.google.de/maps/dir/Berlin/LOXXESS+AG,+Steinauer+Weg,+Aurach/@50.8631199,9.9402659,7z/data=!3m1!4b1!4m13!4m12!1m5!1m1!1s0x47a84e373f035901:0x42120465b5e3b70!2m2!1d13.404954!2d52.5200066!1m5!1m1!1s0x4798bfb6329db8d7:0x4e9faee34949c7c2!2m2!1d10.42285!2d49.25363>, Zugriff am: 14.02.2020.

- Google Maps (o.J.f): Hamburg nach LOXXESS AG, Aurach, verfügbar unter: <https://www.google.de/maps/dir/Hamburg/LOXXESS+AG,+Steinauer+Weg,+Aurach/@51.3669792,8.5832815,7z/data=!3m1!4b1!4m13!4m12!1m5!1m1!1s0x47b161837e1813b9:0x4263df27bd63aa0!2m2!1d9.9936819!2d53.5510846!1m5!1m1!1s0x4798bfb6329db8d7:0x4e9faee34949c7c2!2m2!1d10.42285!2d49.25363>, Zugriff am: 14.02.2020.
- Google Maps (o.J.g): Köln nach LOXXESS AG, Aurach, verfügbar unter: <https://www.google.de/maps/dir/Köln/LOXXESS+AG,+Steinauer+Weg,+Aurach/@50.0494645,6.4511907,7z/data=!3m1!4b1!4m13!4m12!1m5!1m1!1s0x47bf259169ab2fe5:0x42760fc4a2a77f0!2m2!1d6.9602786!2d50.937531!1m5!1m1!1s0x4798bfb6329db8d7:0x4e9faee34949c7c2!2m2!1d10.42285!2d49.25363>, Zugriff am: 14.02.2020.
- Google Maps (o.J.h): München nach LOXXESS AG, Aurach, verfügbar unter: <https://www.google.de/maps/dir/München/LOXXESS+AG,+Steinauer+Weg,+Aurach/@48.7846816,9.902935,8z/data=!3m1!4b1!4m13!4m12!1m5!1m1!1s0x479e75f9a38c5fd9:0x10cb84a7db1987d!2m2!1d11.5819805!2d48.1351253!1m5!1m1!1s0x4798bfb6329db8d7:0x4e9faee34949c7c2!2m2!1d10.42285!2d49.25363>, Zugriff am: 14.02.2020.
- Granello, S./ et.al. (2015): Consumer behaviour on washing, *Mistra Future Fashion*.
- Greenpeace Energy (2019): Jahresverbrauchsabrechnung für Strom, verfügbar im elektronischen Anhang.
- Groß, R./ et.al. (2012): Untersuchung der Einsatzmengen von schwer abbaubaren organischen Inhaltsstoffen in Wasch- und Reinigungsmitteln im Vergleich zum Einsatz dieser Stoffe in anderen Branchen im Hinblick auf den Nutzen einer Substitution, Freiburg/ Frankfurt.
- Gütermann GmbH (o.J.): Set Denim, verfügbar unter: <https://consumer.guetermann.com/de/produktfinder/set-denim>, Zugriff am: 08.02.2020.
- Hackett, T. (2015): A Comparative Life Cycle Assessment of Denim Jeans and a Cotton T-Shirt, The Production of Fast Fashion Essential Items From Cradle to Gate, in: *Theses and Dissertations Retailing and Tourism Management*, Vol. 9.
- Hamed, Y./ et. al (2018): Climate impact on surface and groundwater in North Africa: a global synthesis of findings and recommendations, in: *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 3:25, S. 1-15.

- Hedman, E. (2018): Comparative Life Cycle Assessment of Jeans, A case study performed at Nudie Jeans, Stockholm.
- Heintz, A. (2017): Thermodynamik der Mischungen, Mischphasen, Grenzflächen, Reaktionen, Elektrochemie, äußere Kraftfelder, Berlin.
- Hirzel, S./ et. al. (2013): Industrielle Abwärmenutzung, Karlsruhe.
- Hunger, K. (2003): Industrial Dyes-Chemistry, Properties, Applications, Weinheim.
- Industria Jeanologica S.L. (o.J.): Laser and eco products, verfügbar unter: <https://www.jeanologia.com/products/>, Zugriff am: 11.01.2020.
- Industrieverband Körperpflege und Waschmittel e.V. (2015): Beispielhafte Rezeptur eines Vollwaschmittels im Wandel der Zeit, verfügbar unter: https://www.ikw.org/fileadmin/ikw/Haushaltspflege/Informationsserie/WM/dateien/html/3_4_1.html, Zugriff am: 10.10.2019.
- Industrieverband Körperpflege und Waschmittel e.V. (2016): Zahlen zum Waschen in Deutschland 2014, verfügbar unter: https://www.ikw.org/fileadmin/ikw/Haushaltspflege/Informationsserie/WM/dateien/pdf/3_5.pdf, Zugriff am: 10.10.2019.
- Institut national de la statistique Tunisie (2016): 1ère Immatriculation des véhicules par catégorie, verfügbar unter: <http://dataportal.ins.tn/fr/DataAnalysis?bZKNILxIUeWeS35Okf-P7Q>, Zugriff am: 03.01.2020.
- International Energy Agency (IEA) (2019): IEA Electricity Information 2019, Electricity generation by source, verfügbar unter: <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/electricity-statistics>
- International Energy Agency (IEA) (2018): Tunisia country profile, verfügbar unter: <https://www.iea.org/countries/tunisia>, Zugriff am: 26.01.2020.
- International Maritime Organization (2019): IMO 2020 - cleaner shipping for cleaner air, verfügbar unter: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/34-IMO-2020-sulphur-limit-.aspx>, Zugriff am: 26.02.2020.
- Jack, T. (2013): Laundry routine and resource consumption in Australia, in: International Journal of Consumer Studies, Vol. 37, S. 666-674.
- JEANS FRITZ Handelsgesellschaft für Mode mbH (o.J): Die Jeans - Zahlen & Fakten, verfügbar unter: <https://karriere.jeans-fritz.com/unternehmen/zahlen-fakten.html>, Zugriff am: 19.01.2020.
- Karakocak, B./ Yenigün, O./ To-raman, R. (2013): An Integrated approach to water management in Kayseri- rainwater collection and use in an amusement park, in: Water Science & Technology, Vol. 67, No. 5, S. 1137-1143.

- Karthik, T./ Murugan, R. (2017): Carbon footprint in denim manufacturing, in: Muthu, S.: Sustainability in Denim, Oxford, S. 125-159.
- KlimaInvest Green Concepts GmbH (2019): Ökostromzertifikat, Loxxess Neuburg GmbH & Co. KG/ Betriebsstätte Aurach, Hamburg.
- Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009): Ökobilanz (LCA), Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf, Weinheim.
- Köneke, T. (2020): Mailverlauf mit Köneke, T., Mitarbeiterin Controlling AA, verfügbar im elektronischen Anhang.
- Korolkow, J. (2015): Konsum, Bedarf und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland, Aachen.
- Kühnl, S./ Hang, K. N. (2011): The denim bible jeans encyclopedia III, Mailand.
- Kunststoffmagazin Online (2013): Thermoplastische Verbundwerkstoffe erobern den Fahrzeugbau, verfügbar unter: https://www.kunststoff-magazin.de/_fileNotFound_true_.htm?id=25498, Zugriff am: 16.02.2020.
- Laitala, K./ Klepp, I. G./ Boks, C. (2012): Changing laundry habits in Norway, in: International Journal of Consumer Studies, 36, S. 228-237.
- Lenzing Aktiengesellschaft (o.J): Tencel Denim, verfügbar unter: <https://www.tencel.com/denim>, Zugriff am: 10.01.2020.
- Levi Strauss & Co. (2009): A Product Lifecycle Approach to Sustainability, San Francisco.
- Levi Strauss & Co. (2015): The life cycle of a jean, Understanding the environmental impact of a pair of Levis 501 jean, San Francisco.
- LG Electronics Deutschland (2016): Studie zur Wäschepflege in Deutschland 2016, Vorstellung ausgewählter Ergebnisse.
- Loxxess Neuburg GmbH & Co.KG (2020a): ArmedAngels ÖKO-Bilanz 2019.xlsx, verfügbar im elektronischen Anhang.
- Loxxess Neuburg GmbH & Co.KG (2020b): ArmedAngels ÖKO-Bilanz 2019 Abfall.xlsx, verfügbar im elektronischen Anhang.
- Lüdemann, L./ Feig, K. (2014): Vergleich von Softwarelösungen für die Ökobilanzierung – eine softwareergonomische Analyse, Logistics Journal, 09/2014, S.1-17.
- Luiken, A./ Bouwhuis, G. (2015): Recovery and recycling of denim waste, in: Denim, Manufacture, Finishing and Applications, Oxford, S. 527-540.
- Maier, A./ Warkentin, R. (2020): Mailverlauf mit Maier, A./ Warkentin, R., Ansprechpartner bei Maxcluster, verfügbar im elektronischen Anhang.

- Maratek Environmental Inc. (o.J.): Solvent recycling equipment, verfügbar unter: <https://www.maratek.com/en/solvent-recycling-equipment-sp-bu>, Zugriff am: 26.02.2020.
- Marchesin, S. (2020): Mailverlauf mit Marchesin, S., Mitarbeiterin Kundenservice bei Nearchimica S.p.A., verfügbar im elektronischen Anhang.
- Mathes, M./ Dötsch, W. (1995): WO1997010173A1, Genf, Schweiz: World Intellectual Property Organisation
- McLoughlin, J./ Hayes, S./ Paul, R. (2015): Cotton fibre for denim manufacture, in: Paul, R., Denim, Manufacture, Finishing and Applications, Cambridge, S. 15-36.
- McQueen, R./ et. al. (2016): Reducing laundering frequency to prolong the life of denim jeans, in: International Journal of Consumer Studies, Vol. 41, No.1, S. 1-10.
- Meksi, N./ Mhenni, M. F. (2015): Indigo Dyeing technology for denim yarns, in: Paul, R., Denim, Manufacture, Finishing and Applications, Cambridge, S. 69-105.
- Mercedes Benz AG (o.J): Technische Daten des Sprinter Kastenwagens, verfügbar unter: <https://www.mercedes-benz.de/vans/de/sprinter/panel-van/technical-data>, Zugriff am: 15.02.2020.
- Meyer & Meyer Holding SE & Co. KG (2020): CO₂-Auswertung Arnedangels, Osna-brück.
- mobile.de GmbH (o.J) Technische Daten Mercedes A-Klasse (W176) seit 2012, verfügbar unter: <https://www.mobile.de/auto/mercedes/a-klasse/2012/schraegheck/modell/daten-fakten>, Zugriff am: 16.02.2020.
- MUD Jeans International B.V. (2015): Carbon Footprint Study of Mud Jeans, Laren.
- MUD Jeans International B.V. (o.J.): Nachhaltigkeit, verfügbar unter: <https://mudjeans.eu/nachhaltigkeit-unser-einsatz/?lang=de>, Zugriff am: 12.01.2020.
- Muth, L. (2020): Persönliches Gespräch, Köln.
- Muthu, S. (2015b): Comparative life cycle assessment of natural and man-made textiles, in: Muthu, S.: Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing, Oxford, S. 275-281.
- Muthu, S. (2015c): Measuring the reusability of textile products, in: Muthu, S.: Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing, Oxford, S. 83-92.
- Muthu, S. (2015a): Environmental impacts of the use phase of the clothing life cycle, in: Muthu, S.: Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing, Oxford, S. 93-102.

- Muthu, S. (2012): Carbon Footprint Reduction in the Textile Process Chain, Recycling of Textile Materials, in: *Fibers and Polymers*, Vol. 13, No. 8, S. 1065-1070.
- Nagl, G. (2000): Sulfur Dyes, in: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Vol. 35, 119-128.
- Nearchimica S.p.A. (2015): Material Safety Data Sheet, NEARISERVE D-SW, Legnano.
- Nearchimica S.p.A. (2018a): Material Safety Data Sheet, NEARSTONE N-GTS, Legnano.
- Nearchimica S.p.A. (2018b): Material Safety Data Sheet, NEARBLEACH E CLOUD, Legnano.
- Nearchimica S.p.A. (2019a): Material Safety Data Sheet, KATALIN SKY WHITE, Legnano.
- Nearchimica S.p.A. (2019b): Material Safety Data Sheet, NEARBLEACH SKY WHITE, Legnano.
- Nearchimica S.p.A. (2019c): Material Safety Data Sheet, NEARCAND NCP, Legnano.
- Nearchimica S.p.A. (2020a): Material Safety Data Sheet, NEARCAND OP EXTRA, Legnano.
- Nielsen, A. M./ Nielsen, P. H. (2009): Comparative life cycle assessment of the Elemental T-shirt produced with biotechnology and a Conventional T-shirt produced with conventional technology, Bagsværd.
- Nordland Chemie (o.J.): Quaternary Ammonium Ester Quat Softener, verfügbar unter: http://www.nordland-chemie.com/_Products/NLC_Quaternary_Ammonium.pdf, Zugriff am: 20.02.2020.
- OFRU Recycling GmbH & Co. KG (o.J.) Solvent Recovery, System recommendation and product overview, verfügbar unter: <https://www.ofru.com/en/products/solvent-recovery/cost-savings-through-solvent-recovery/>, Zugriff am: 26.02.2020.
- Onder, N. S. (2020): Mailverlauf mit Onder, N. S., Verantwortliche für Nachhaltigkeit bei ORTA Anadolu Tic. ve San. İ̇şl. A.Ş, verfügbar im elektronischen Anhang.
- Orta Anadolu Tic. ve San. İ̇şl. A.Ş. (2018a): Environmental Product Declaration, in accordance with ISO14025 for Luzon (7882), Ilocos (9046), Visayas (9595) and Bicol (9595R) denim, Kayseri, verfügbar im elektronischen Anhang.

Orta Anadolu Tic. ve San. İşl. A.Ş.	(2018b): Fabric Specification Sheet, Kayseri, verfügbar im elektronischen Anhang.
ORTA Anadolu Tic. ve San. İşl. A.Ş.	(2019a): LCA study of denim fabrics for ARME-DANGELS, Kayseri, verfügbar im elektronischen Anhang.
ORTA Anadolu Tic. ve San. İşl. A.Ş.	(2019b): Cogeneration-ORTA.xlsx, verfügbar im elektronischen Anhang.
Orta Anadolu Tic. ve San. İşl. A.Ş.	(2020): Rohdaten- Input Output Table.xlsx, verfügbar im elektronischen Anhang.
Pal, H./ Chatterjee K. N./ Sharma, D.	(2017): Water footprint of denim industry, in: Muthu, S.: Sustainability in Denim, Oxford, S. 111-123.
Palebluedot LCC	(o.J.): Greenhouse Gas Inventories, verfügbar unter: http://palebluedot.llc/greenhouse-gas-inventories , Zugriff am: 18.01.2020.
Pandey, S. C./ et. al.	(2011): U.S. Patent 7,872,144, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
Paul, R.	(2015): Denim and jeans: an overview, in: Paul, R., Denim, Manufacture, Finishing and Applications, Cambridge, S. 1-11.
Pehnt, M./ et. al.	(2010): Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung, Heidelberg/ Karlsruhe.
Periyasamy, A. P./ Militky, J.	(2017): Denim and consumers' phase of life cycle, in: Muthu, S., Sustainability in Denim, Oxford, S. 258-282.
Periyasamy, A. P./ Wiener, J./ Militky, J.	(2017): Life-cycle assessment of denim, in: Muthu, S., Sustainability in Denim, Oxford, S. 83-110.
Pesnel, S./ Payet, J.	(2019): Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR), T-shirts, Amberieu en Bugey.
Peters, G./ et. al.	(2015): Carbon Footprints in the Textile Industry, in: Muthu, S., Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing, Oxford, S. 3-30.
Piesga, E.	(2010): Green Fashion, Ökologische Nachhaltigkeit in der Bekleidungsindustrie, Hamburg.
Piorko, L.	(2020): Mailverlauf mit Piorko, L., Vertriebsmitarbeiterin bei YKK Stocko Fasteners GmbH, verfügbar im elektronischen Anhang.
PMCS Property Management Services GmbH	(2018): Betriebskostenabrechnung, verfügbar im elektronischen Anhang.

- Polizzi Di Sorrentino, E./ et.al. (2016): Consumers and their behavior: state of the art in behavioral science supporting use phase modeling in LCA and ecodesign, in: International Journal of Lifecycle Assessment, Vol. 21, S. 237–251.
- Prochimica Novarese (2015): Material Safety Data Sheet, Novasoft KW, verfügbar im elektronischen Anhang.
- Quantis (2018): Measuring Fashion, Environmental Impact of the Global Apparel and Footwear Industry, Lausanne.
- Raab, K. (2019): Flugscham, der dumme Weltbürger, verfügbar unter: <https://www.zeit.de/entdecken/reisen/2019-05/flugscham-fliegen-reisen-umwelt-oekologisch-co2>, Zugriff am: 19.01.2020.
- Rana, S./ et. al. (2015): Life cycle assessment of cotton textiles and clothing, in: Muthu, S.: Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing, Oxford, S. 195-216.
- Ranke, U. (2019): Klima und Umweltpolitik, Berlin/ Heidelberg.
- Reif, K. (2012): Dieselmotor-Management, Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung, 5. Auflage, Wiesbaden.
- Rengel, A. (2017): Recycled Textile Fibres and Textile Recycling, An overview of the Market and its possibilities for Public Procurers in Switzerland, Bern.
- Rheinenergie AG (2019): Abrechnung, verfügbar im elektronischen Anhang.
- Rheinenergie AG (o.J.): Unsere Trinkwasserangebote, verfügbar unter: https://www.rheinenergie.com/de/privatkunden/waerme_wasser/trinkwasser/trinkwasser.html#acc-750463-0, Zugriff am: 02.02.2020.
- Rogers, D. (1942): U.S. Patent 2,281,715A, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Roos, S./ et. al. (2015b): Environmental assessment of Swedish fashion consumption, Five garments, sustainable futures, Goethenburg.
- Roos, S./ et. al. (2015a): Is Unbleached Cotton Better Than Bleached? Exploring the Limits of Life-Cycle Assessment in the Textile Sector, in: Clothing and Textiles Research Journal, Vol. 33, No. 4, S. 231-247.

Rudolf GmbH	(o.J.): Polyethylene emulsions, verfügbar unter: http://www.rudolf-duraner.com.tr/en/products/co-producer-b2b/80-polyethylene-emulsions.html , Zugriff am: 28.11.2019.
Sanko Tekstil İşletmeleri San. ve Tic. A.Ş.	(2018): Environmental Product Declaration, for ISKO26610 Basic denim fabric in accordance with ISO 14025, Inegöl/ Bursa.
Sanko Tekstil İşletmeleri San. ve Tic. A.Ş.	(2019): ISKO R-TWO™, verfügbar unter: https://iskodenim.com/sustainable-fashion-isko-rtwo , Zugriff am: 10.01.2020.
Sayaera, H./ Som, A./ Abdullah, Z.	(2014): Ethanol Production via Direct Hydration of Ethylene, A review, Conference Paper, International Conference on Global Sustainability and Chemical Engineering.
Schmidt, A. J.	(2020): Mailverlauf mit Schmidt, A. J., Leiter der Produktionsstätte in Ludwigshafen der Dystar Colours Distribution GmbH, verfügbar im elektronischen Anhang.
Schönberger, H./ Schäfer, T.	(2003): Beste verfügbare Techniken in Anlagen der Textilindustrie, Berlin.
Schrott, W./ Paul, R.	(2015): Environmental impacts of denim manufacture, in: Denim, Manufacture, Finishing and Applications, Oxford, S. 563-580.
Schwochow, F./ Puppe, L.	(1975): Zeolithe - Herstellung, Struktur, Anwendung, in: Angewandte Chemie, Vol. 87, Nr. 18, S. 659-667.
Small Industries Service Institute	(2003): Sulphur Black Dye, verfügbar unter: http://www.dcsmse.gov.in/publications/pmry-prof/chemical/ch22.pdf , Zugriff am: 18.02.2020.
Social Fashion Company GmbH	(o.J.): MAIRAA, Mom Fit High Waist, verfügbar unter: https://www.armedangels.de/frauenbekleidung-denims-5-pockets-mom-solid-mairaa-10253550-130.html , Zugriff am: 18.01.2020.
Social Fashion Company GmbH	(2019a): Open costing sheet, MAIRAA faded blue, Köln.
Social Fashion Company GmbH	(2019b): Materialübersicht, MAIRAA faded blue, Köln.
Social Fashion Company GmbH	(2019c): Rechnungen Speditionen 2019.xlsx, verfügbar im elektronischen Anhang.

- Social Fashion Company GmbH (2020): Auszug ERP System AA, Mengen & Umsatz 2019 nach Ländern, verfügbar im elektronischen Anhang.
- Stadtwerke Lünen (2018): Energieträgermix 2018, verfügbar unter: <https://www.stadtwerke-luene.de/privatkunden/strom/energetraegermix/>, Zugriff am: 12.02.2020.
- Statista (2017): Statista Umfrage Putz-, Reinigungs- und Waschmittel 2017, Statista Konsumentenbefragung - Tabellenband, verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/59043/dokument/putz-reinigungs-und-waschmittel-2017/>, Zugriff am: 18.12.2020.
- Statista (2018): Denim market worldwide, verfügbar unter: <https://www.statista.com/study/40656/denim-market-worldwide/>, Zugriff am: 20.11.2019.
- Statista (2019a): Durchschnittlicher Besitz und Kauf von Jeans unter Frauen in Deutschland im Jahr 2018, verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/947130/umfrage/durchschnittlicher-besitz-und-kauf-von-jeans-unter-frauen-in-deutschland/>, Zugriff am: 03.12.2019.
- Statista (2019b): Worauf legen Sie besonders Wert bei der Auswahl nachhaltiger Denim-Labels?, verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1036871/umfrage/umfrage-unter-modaendlern-zur-auswahl-nachhaltiger-labels-bei-jeans/>, Zugriff am: 12.12.2019.
- Statista (2020): Höhe der Treibhausgasemissionen nach Quellgruppe im Jahr 2014 (in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent), verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/311844/umfrage/globale-treibhausgasemissionen-nach-quellgruppe/>, Zugriff am: 23.02.2020.
- Statistisches Bundesamt (2019): Abfallwirtschaft, verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html, Zugriff am: 22.02.2020.
- Steffen, W./ et.al. (2015): Planetary boundaries, Guiding human development on a changing planet, in Science-mag, Vol. 347, Issue 6223, S. 1-10.
- Steinberger, J./ et. al. (2009): A spatially explicit life cycle inventory of the global textile chain, in: International Journal of Life Cycle Assessment, 14, S. 443-455.
- Steingruber, E. (2012): Indigo and Indigo Colorants, in: Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol.19, Weinheim.
- Stibbe, A. (2017): Globales Life-Cycle-Controlling Footprinting in der Praxis, Wiesbaden.

- Strittmacher, K. (2019): Flugscham und die Folgen, Sie schämen sich doch, verfügbar unter: <https://www.sued-deutsche.de/reise/flugscham-schweden-deutschland-1.4649460>, Zugriff am: 19.01.2020.
- Sustainable Apparel Coalition (2019): Higg Materials Sustainability Index (MSI) Methodology, San Francisco.
- Svara, J./ et.al. (2006): Phosphorus Compounds, Organic, in: Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. 27, Weinheim.
- Tejidos Royo S. L. (2018): Conscious actions, Sustainability report 2018, Picassent.
- Textile Exchange (2014): Life Cycle Assessment (LCA) of Organic Cotton, A global average, Leinfelden-Echterdingen.
- TextilWirtschaft (2019): Sustainability, Haltung, Engagement, Achtung: Wie ein neues Bewusstsein das Fashion Business verändert, TW 40/2019.
- The Reformations Inc. (o.J.) High & Skinny Jean, verfügbar unter: <https://www.thereformation.com/products/high-skinny-jean?color=Gibson&via=Z2kOi8vcmVm-b3JtYXRpb24td2VibGluYy9Xb3JrYXJlYTo-6Q2F0YWxvZzo6Q2F0ZWdvcnkvNW/NhYmYx-OTlmMzViZTlxYzc0NzhIYzM5>, Zugriff am: 18.01.2020.
- Thinkstep GmbH (o.J.a): Get Consistent and Reliable LCA Data, verfügbar unter: <https://www.thinkstep.com/sustainability-data/lci-data/lca-databases>, Zugriff am: 03.03.2020.
- Thinkstep GmbH (o.J.b): Description of the CML 2001 Method, verfügbar unter: <http://www.gabi-software.com/deutsch/my-gabi/gabi-documentation/gabi-lcia-dokumentation/cml-2001/>, Zugriff am: 25.02.2020.
- Thinkstep GmbH (o.J.c): Environmental Footprint (EF)/ILCD recommendation, verfügbar unter: <http://www.gabi-software.com/deutsch/my-gabi/gabi-documentation/...cia-dokumentation/environmental-foot-print-efilcd-recommendation/>, Zugriff am: 25.02.2020.
- Thinkstep GmbH (o.J.d): Extension database XV: Textile finishing, verfügbar unter: <http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-database-2020-lci-documentation/extension-database-xv-textile-finishing/>, Zugriff am: 02.03.2020.
- Tillman, A. (2000): Significance of decision-making for LCA methodology, in: Environmental Impact Assessment Review, Vol. 20, S. 113–123.

U.S. National Library of Medicine (o.J.a): Hydrogen cyanide, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/768>, Zugriff am: 21.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.b): 2-(Phenylamino)acetonitrile, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/76372>, Zugriff am: 21.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.c): N-Phenylglycine, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/66025>, Zugriff am: 21.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.d): Hydrogen, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/783>, Zugriff am: 21.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.e): Sulfur, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5362487>, Zugriff am: 21.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.f): Oxygen, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/977>, Zugriff am: 21.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.g): Carbon dioxide, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/280>, Zugriff am: 21.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.h): Phosphoric acid, ethyl ester, verfügbar unter: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Phosphoric-acid_-ethyl-ester, Zugriff am: 21.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.i): Stearyl alcohol, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/8221>, Zugriff am: 20.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.j): Stearate, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Stearate>, Zugriff am: 20.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.k): Dioxane, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/31275#section=Density>, Zugriff am: 22.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.l): Acetonitrile, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6342#section=Density>, Zugriff am: 22.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.m): Ammonia, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/222#section=Uses>, Zugriff am: 24.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.n): Polyvinyl alcohol, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/11199>, Zugriff am: 26.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.o): Nitric oxide, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/145068>, Zugriff am: 27.02.2020.

U.S. National Library of Medicine (o.J.p): Acetic Acid, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/176>, Zugriff am: 03.03.2020.

- U.S. National Library of Medicine (o.J.q): Citric Acid, verfügbar unter: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/311>, Zugriff am: 03.03.2020.
- Umweltbundesamt (2012a): Hintergrund, Klimawirksamkeit des Flugverkehrs, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (2012b): Grundwasser, verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/grundwasser>, Zugriff am: 02.02.2020.
- Umweltbundesamt (2015): Abgasgrenzwerte für LKW und Busse (Fahrzeuge ab 2.610 kg; Grenzwerte für die Typ- und Serienprüfungen), verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/schwere-nutzfahrzeuge>, Zugriff am: 03.01.2020.
- Umweltbundesamt (2016): Grenzwerte für Schadstoffemissionen von PKW, verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/dateien/tabelle_grenzwerte_fuer_schadstoffemissionen_von_pkw.pdf, Zugriff am: 25.02.2020.
- Umweltbundesamt (2018): Contribution of NFR categories to the emissions/Anteile der NFR-Kategorien an den Emissionen, verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/bilder/dateien/iir_2018_cats_pollutants.pdf, Zugriff am: 23.03.2020.
- Umweltbundesamt (2019a): Schwefeldioxid-Emissionen nach Quellkategorien, verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_schwefeldioxid-emi_2019, Zugriff am: 23.02.2020.
- Umweltbundesamt (2019b): Ammoniak-Emissionen nach Quellkategorien, verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_ammoniak-emi_2019, Zugriff am: 23.02.2020.
- Umweltbundesamt (2019c): Spezifische Emissionsfaktoren für den Deutschen Strommix, verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/spezifische-emissionsfaktoren-fuer-den-deutschen>, Zugriff am: 23.02.2020.
- Uyak, V./ et. al. (2007): Water loss management strategies in Kayseri, Turkey, verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/241618674_WATER_LOSS_MANAGEMENT_STRATEGIES_IN_KAYSERI_TURKEY/citations, Zugriff am: 20.02.2020.
- van der Velden, N. M./ et. al. (2014): LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane, in: International Journal of Life Cycle Assessment, 19, S. 331-356.

- Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e. V./
Öko-Institut e. V. (2013a): Energieverbrauch von Wäschetrock-
nern, verfügbar unter: [https://www.verbraucher-
zentrale-rlp.de/sites/default/files/migration_files/
media246783A.pdf](https://www.verbraucher-
zentrale-rlp.de/sites/default/files/migration_files/
media246783A.pdf), Zugriff am: 16.02.2020.
- Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e. V./
Öko-Institut e. V. (2013b): Energieverbrauch von Waschmaschi-
nen, verfügbar unter: [https://www.verbraucher-
zentrale-rlp.de/sites/default/files/migration_files/
media246707A.pdf](https://www.verbraucher-
zentrale-rlp.de/sites/default/files/migration_files/
media246707A.pdf), Zugriff am: 16.02.2020.
- Voelkl, E./ et.al (1977): U.S. Patent 4,017,593, Washington, DC:
U.S. Patent and Trademark Office.
- Völker, E./ Zimmer, G./ Elendt-Schneider,
B. (2011): Verantwortungsvoller Umgang mit Was-
ser am Beispiel der BASF SE Ludwigshafen, in:
Lozán, J., Warnsignal Klima, Genug Wasser für
alle?, S. 503-511.
- Wanassi, B./ Hassen, M. (2016): Value-added waste cotton yarn: Opti-
mization of recycling process and spinning of
reclaimed fibers, in: Industrial Crops and Pro-
ducts, Vol. 87, S. 27-32.
- Wasserwirtschaftsamt Ansbach (2018): Trinkwasser, unser Lebensmittel Nr. 1,
verfügbar unter: [https://www.wwa-an.bayern.de/
trinkwasser/index.htm](https://www.wwa-an.bayern.de/
trinkwasser/index.htm), Zugriff am: 15.02.2020.
- Willmes, A. (2007): Taschenbuch chemische Substanzen,
Elemente - Anorganika - Organika - Naturstoffe -
Polymere, 3. Auflage, Frankfurt am Main.
- Yacout, D./ El-Kawi, A./ Hassou-
na, M. (2016): Cradle to gate environmental impact
assessment of acrylic fiber manufacturing, in:
International Journal of Lifecycle Assessment,
Vol. 21, S. 326–336.
- Zamani, B./ et. al. (2014): A Carbon Footprint of Textile Recycling,
A Case Study in Sweden, in: Journal of Industri-
al Ecology, Vol. 19, No. 4, S. 1-12.
- Zhu, M. (2019): More sustainable denim production, ver-
fügbar unter: [https://www.sgs.com/en/news/
2019/07/more-sustainable-denim-production](https://www.sgs.com/en/news/
2019/07/more-sustainable-denim-production),
Zugriff am: 10.01.2020.
- Zlitni, S. (2020a): Mailverlauf 1 mit Zlitni S. Verantwortli-
che für die Produktion bei Denim Authority S.A.,
verfügbar im elektronischen Anhang.
- Zlitni, S. (2020b): Mailverlauf 2 mit Zlitni S. Verantwortli-
che für die Produktion bei Denim Authority S.A.,
verfügbar im elektronischen Anhang.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und mich anderer als der in den beigefügten Verzeichnissen angegebenen Hilfsmittel nicht bedient habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Der Durchführung einer elektronischen Plagiatsprüfung stimme ich hiermit zu. Die eingereichte elektronische Fassung der Arbeit entspricht der eingereichten schriftlichen Fassung exakt. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht. Ich bin mir bewusst, dass eine unwahre Erklärung rechtliche Folgen hat.

Düsseldorf, 05.03.2020

(Ort und Datum)

(Originalunterschrift des Verfassers)

Anhang

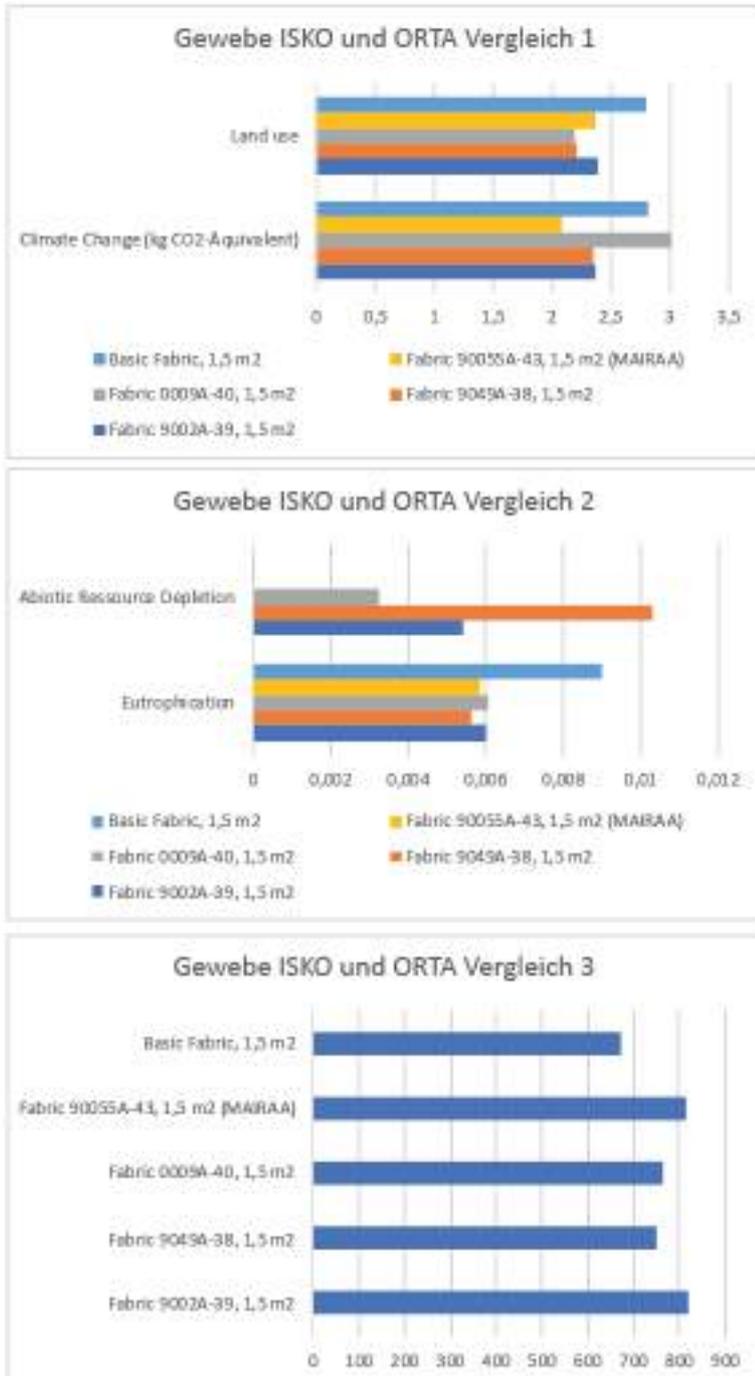
Anhang 1: Übersicht PCR „Trousers, Shorts and Slacks and similar Garments“

	Vorgaben PCR „Trousers, Shorts, Slacks and similar Garments“	Umsetzung (X/-/✓)	Anmerkung
Produkte	Hosen, Shorts, Freizeithosen und ähnliche Bekleidung, die den unteren Bauch und beide Beine jeweils vollständig oder teilweise bedeckt, u.a. Jeans.	✓	
Deklarierte Einheit	1 Paar Hosen.	✓	
Funktionelle Einheit	Die funktionelle Einheit kann nicht allgemein definiert werden, da die möglichen Downstream-Anwendungen und dementsprechend die Funktionen, sehr unterschiedlich sein können.	✓	
Systemgrenzen	Cradle-to-gate, Nutzungs- und Entsorgungsphase können auf freiwilliger Basis mit eingeschlossen werden.	✓	Nutzungs- und Entsorgungsphase miteingeschlossen zur Vollständigkeit der Betrachtung und um Nutzungsempfehlung AA mit modellieren zu können.
Abschneidekriterien	Daten zu Elementarflüssen in das/ aus dem Produktsystem, die mindestens 99% der Umweltauswirkungen abdecken. Ausgenommen davon sind Prozesse außerhalb der Systemgrenzen.	✓	siehe 5.1.4 Abschneidekriterien.
Datenqualität	Daten im Bezug auf Umweltaspekte (Material und Energieflüsse die in das Produktionssystem einfließen) kommen normalerweise von dem Unternehmen, das die LCA durchführt durchführt.	✓	siehe 5.1.8 Datenerhebung.
	Daten im Bezug zu Auswirkungen der Material- und Energieflüsse werden aus Datenbanken entnommen.	✓	
	Die Daten in Bezug auf Umweltaspekte sollten so spezifisch wie möglich sein	✓	
	Dabei wird zwischen spezifischen/ primären Daten, generischen/ sekundären Daten unterschieden. Sekundäre Daten werden in ausgewählte generische Daten und Stellvertreter-Daten unterteilt. Primäre Daten sind sekundären Daten vorzuziehen.; ausgewählte generische Daten vor Stellvertreter-Daten	✓	
Allokation	Allokation sollte möglichst vermieden werden. Falls möglich indem die Prozesseinheit in zwei oder mehr Unterprozesse gegliedert wird.	✓	Allokationen werden in der vorliegenden Arbeit in erster Linie durch Systemraumerweiterung mit Subtraktion der entsprechenden alternativen Produktionsmöglichkeiten vermeiden, siehe 5.1.6 Allokation.
	Wenn Allokation nicht vermieden werden kann, sollten die Inputs möglichst entsprechend ihrer physikalischen Beziehung und ihrem Einfluss auf die Outputs gewichtet werden.	✓	
	Falls dies nicht möglich, oder zu zeitintensiv ist, sollten die Inputs anhand ihres Verhältnisses zueinander gewichtet werden, entsprechend ihres Wertes. Ökonomische Allokation bedarf einer gesonderten Sensitivitätsanalyse.	✓	
Lebenszyklusschritte			
Upstreamprozesse (cradle-to-gate)	Anbau/ Synthese von Fasern	✓	
	Produktion von Fasern	✓	
	Rohmaterialien werden in ursprünglich und recycelt unterteilt	X	keine recycelten Rohmaterialien als solche modelliert.
	Produktion von Halbfertigprodukten, die im Kernprozess genutzt werden	✓	
	Produktion von Hilfsstoffen (Zubehör, Pigmente und Färbemittel, die in Kern- und Upstream-Prozessen benötigt werden. Produktion von Verpackungen, falls möglich)	✓	
	Wirkungen, die durch die Produktion von Elektrizität und Kraftstoffe während dem Upstream-Prozess entstehen	✓	
	Produktion von primärer und sekundärer Verpackung	✓	
	Produktion von Zutaten und anderen Materialien	✓	
	Vorbereitung von Fasern, wie bleichen.	-	Nicht relevant, Fasern werden nicht chemisch vorbehandelt.
	Ausgeschlossen: Transport der Rohmaterialien, Gebäude und andere Infrastruktur beim Produzenten (Investitionsgüter), Personalaktivitäten, also auch Arbeitswege, Abfälle aus dem Abriss von Gebäuden und anderer Infrastruktur	✓	Außer die Flugreisen des AA Personals sind aufgrund des direkten Produktbezugs enthalten.
Daten über Upstream-Prozesse, auf die das Unternehmen direkten Einfluss hat, sollten on-site erfasst werden.	✓		

	Daten über Hauptteile, Verpackung und Hauptzutaten, die von Lieferanten stammen, sollten als primäre Daten angefragt werden.	✓	
	Der Transport von Hauptteilen und Komponenten entlang der Lieferkette zu einem Lager, von dem der Transport zu dem Produzenten stattfindet sollte entsprechend dem tatsächlichen Transportmittel, der zurückgelegten Distanz und der Beladung kalkuliert werden	✓	
	Die genutzte Elektrizität sollte möglichst dem generierten oder gelieferten Strom des Stromlieferanten entsprechen, falls nicht verfügbar: National residual electricity mix (mit Herkunftsnachweis), falls nicht verfügbar: National electricity production mix.	✓	
	Für Verpackungen sollten primäre Daten genutzt werden, wenn die Produktion im direkten Einflussbereich des Unternehmens liegt, oder mehr als 10% der Umweltauswirkungen des Produkts ausmachen.	-	Dies ist nicht der Fall.
Kernprozesse (gate-to-gate)	Externer Transport zu den Kernprozessen	✓	
	Vorbereitung des Materials (spinnen, stricken, verstrecken, schlichten, Veredelung)	✓	
	Produktion des finalen Produkts	✓	
	Qualitätskontrolle und Verpackung von Bekleidung und Müll, der bei diesen Prozessen anfällt	✓	
	Interner Transport des Gewebes zum Lager	✓	
	Entsorgungsphase des Produktionsabfalls, falls möglich	✓	
	Wartung der Maschinen	×	Bei Denim Authority inkludiert, bei ORTA unbekannt.
	Wirkungen, die durch die Produktion von Elektrizität und Kraftstoffe während dem Kernprozess entstehen	✓	
	Die Produktion von Rohmaterialien, die in der Produktion von allen Produktteilen verwendet werden	✓	
	Minimum 99% des Gewichts der deklarierten Einheit, inklusiver Verpackung	✓	
	Ausgeschlossen: Herstellung der Produktionsmaschinen, Gebäude und andere Investitionsgüter, Geschäftsreisen, An- und Abreise zur Arbeit des Personals, Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten	✓	S.o.
	Primäre Daten sollten für die Montage des Produkts, die Produktion der Hauptkomponenten und die on-site Generation von Dampf, Hitze, Elektrizität erfasst werden.	✓	
	Nutzung von Elektrizität siehe Upstream-Prozesse	✓	
	Transport von Rohmaterialien, Hauptkomponenten, Zutaten, Chemikalien zu der Produktionsstätte sollten entsprechend dem tatsächlichen Transportmittel, der zurückgelegten Distanz und der Beladung kalkuliert werden	×	Die Transporte der Zutaten und Chemikalien sind nicht eingeschlossen, da diese aufgrund des geringen Gewichts als nicht relevant eingeschätzt werden
	Behandlung von Produktionsabfällen sollte auf primären Daten basieren, falls verfügbar	✓	
Downstream-Prozesse (gate-to-grave):	Transport von der Produktion zu einem durchschnittlichen Verkaufspunkt	✓	
	Freiwillig: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Gebrauchsphase, inklusive der Nutzungshäufigkeit. Grundlagen der getroffenen Annahmen festlegen</i> • <i>Verkauf, entweder online oder stationär</i> • <i>Anreise von Endkunden zum Store</i> • <i>Gebrauch beim Konsumenten, waschen, trocknen, bügeln</i> • <i>Recycling und Handhabung von Verpackungsmüll und Material nach dem Gebrauch</i> • <i>Produktentsorgung</i> 	✓	
	Daten bezüglich der Nutzungsphase beruhen auf Szenarien, außer wenn primäre Daten verfügbar und relevant sind	✓	
	Daten zu den Schadstoffemissionen aus der Nutzungsphase sollten auf dokumentierten Tests, verifizierten Studien in Verbindung mit durchschnittlicher oder typischer Produktnutzung oder Empfehlungen zur geeigneten Produktnutzung beruhen.	-	Nur eingeschränkt verfügbar.
	Die genutzte Elektrizität sollte möglichst dem National residual electricity mix (mit Herkunftsnachweis) entsprechen, falls nicht verfügbar: National electricity production mix.	✓	
Der Transport des Endprodukts zum Konsumenten sollte möglichst die tatsächliche Situation abbilden, bezüglich Distanz und Transportmittel	✓		
Szenarien für die Entsorgungsphase sollten technisch, ökonomisch praktikabel sein und den aktuellen Regulierungen entsprechen. Annahmen hierzu sollten entsprechend dokumentiert werden.	✓		

Wir- kungs- kategorien	Erforderlich: Global Warming Potential (GWP), Eutrophication Potential (EP), Acidification Potential (AP), Photochemical Oxidant Formation Potential (POFP) und Water Scarcity Footprint (WSF). Weitere Größen können auf freiwilliger Basis hinzugefügt werden.	-	
Quelle: EPD International AB (2019).			

Anhang 2: Gegenüberstellung Denim Gewebe ORTA und ISKO



Anhang 4: Detailauswertung abschließendes Ergebnis

