

Abschlussbericht



Projektname: *"Vergleichende Ökobilanz von Leder, Kunstleder und Trendsustituten"*

Bewilligungsempfänger:

FILK Freiberg Institute gGmbH
Herr Dr.-Ing. Bernhard Trommer (Autor)
Meißner Ring 1-5
09599 Freiberg



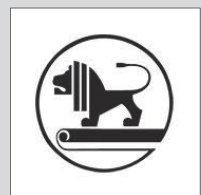
Tel: 03731 366 147
E-Mail: bernhard.trommer@filkfreiberg.de

Gesellschafter: Verein zur Förderung des FILK Freiberg Institute e. V.

Geschäftsführer: Prof. Dr. rer. nat. Dr. Haiko Schulz, Dr. Michael Meyer
Gemeinnützige Gesellschaft mit beschränkter Haftung, Sitz: Freiberg/Sachsen
Registergericht Chemnitz, HRB 482, Ust-IdNr.: DE141133208

Kooperationspartner 1:

Vowalon Beschichtung GmbH
Herr Gregor Götz
Bahnhofstraße 46 - 48
08233 Treuen



Tel: 0374 68 60 200
E-Mail: gregor.goetz@vowalon.de
mareen.goetz@vowalon.de

Geschäftsführer: Gregor Götz und Mareen Götz
Registergericht: Amtsgericht Chemnitz, HRB 1072

Kooperationspartner 2:

HELLER-Leder GmbH & Co. KG
Herr Ekkehard Werner
Hauptstraße 1
37619 Hehlen



Tel: 05533 9702 321
E-Mail: e.werner@heller-leder.com

Geschäftsführer: Thomas Strebost, Franz Fiedler
Registergericht: Amtsgericht Hildesheim, HRA 110481

Projektlaufzeit: 28 Monate

Zusammenfassung

Leder und Kunstleder decken als Flächenwerkstoffe ein breites Spektrum für Konsumgüter ab. Preis, Modetrends und Markenprestige steuern das Einkaufsverhalten. Zunehmend achten Konsumenten auf ökologische Aspekte /3/. Als Ersatz für etablierte Werkstoffe erscheinen am Markt spezielle Trends Substitute unter den verschiedensten Produktnamen. Sie nehmen für sich in Anspruch, eine Alternative zu Leder und Kunstleder darzustellen und wollen diese nachhaltig ersetzen. Sie werden als ökologisch und auf das Tierwohl bedacht beworben /13/. Trends Substitute sollen das besondere Lebensgefühl von Konsumenten als die Abkehr von fossilen hin zu nachwachsenden Rohstoffquellen widerspiegeln. Gern wird der Verzicht auf tierische Rohstoffe, die Verarbeitung von Pflanzenfasern oder der Einsatz von Rezyklat betont. Kreative Produktnamen liefern jedoch wenig Aufklärung über Herkunft und Zusammensetzung der Materialien /4/. Hilfe sollen Umweltlabel und Produktzertifikate schaffen, führen aber nicht selten zu mehr Verwirrung /24/. Fundierte Aussagen liefern Ökobilanzen nach DIN EN ISO 14040/44. Sie sind jedoch nur mit hohem Aufwand und Kosten zu erstellen.

Das Vorhaben führte in einer branchenübergreifenden Kooperation von zwei mittelständischen Unternehmen und einer unabhängigen Forschungseinrichtung technologisches, werkstoffkundliches und ökologisches Know-how zu einer vergleichenden Ökobilanz zwischen Leder, Kunstleder und alternativen Trends Substituten zusammen. Der Vergleich wurde für die Anwendung als Möbelbezugs material geführt. Dabei stellten sich bewusst Produzenten konkurrierender Werkstoffe, nämlich Leder und Kunstleder, unter die Moderation einer unabhängigen Forschungseinrichtung. Muster von Trends Substituten wurden bestellt und Hersteller angefragt. Der detaillierte Vergleich von konkret ausgewählten Produkten mit identischer Verwendung aber grundverschiedenen Technologien wurde in dieser Art und Weise erstmalig beschrritten. Schwerpunkt der Arbeiten waren Aussagen zur Nachhaltigkeit dieser Werkstoffe an Hand ihrer Ökobilanzen. Das Vorhaben soll einem ökologischen Vergleich von Werkstoffen dienen, welche aktuell als Möbelbezugsstoffe eingesetzt werden und ist als eine Hilfestellung in der Produktentwicklung und zur Information der Verbraucher anzusehen.

Da der Aufwand für die Erstellung von Ökobilanzen nach DIN EN ISO 14040/44 sehr hoch ist, musste eine für die Ressourcen der beteiligten Unternehmen und den vorhandenen Projektmitteln angemessene Methodik entwickelt werden. Dies gelang durch die Anwendung des Prinzips von Pareto nach der 80:20-Regel. Maßgeblichen Einflussfaktoren wurden im Sinne eines zweckgebundenen Modells (Produktvergleich) verdichtet und ein vereinfachtes Abbild von Ausschnitten der Wirklichkeit hergestellt. Der Erkenntnisgewinn des Vorhabens basierte auf der Einheitlichkeit von Methode und Interpretation der betrachteten Produktionssysteme in Proportion zueinander. Für das Projekt stellten die Projektpartner aus ihrer aktuellen Produktion Daten und Materialmuster von zwei Kunstledern und drei Rindledern zur Verfügung.

Es handelte sich um ein konventionelles PVC-Schaumkunstableder, ein PVC-Schaumkunstableder mit einem hohen Anteil biobasierter Weichmacher, ein Leder mit konventioneller Gerbung mit Chrom-III-salzen und zwei Ledertypen, welche in unterschiedlichen Rezepturen unter ausschließlicher Verwendung vegetabilen und synthetischer Gerbstoffe produziert werden. Verschiedene Anbieter von Trendsustituten wurden für die Bereitstellung von Informationen und Produktmuster herangezogen.

Das Marketing der Bekleidungs- und Lederbranche zeigt in der Praxis eine hohe Affinität zu summarischen ökologischen Bewertung von Produkten auf der Basis von Rangzahlen, Indizes, Wichtungsfaktoren etc. Diese Herangehensweise stellt eine unzulässige Vereinfachung im Sinne und Wortlaut der DIN EN ISO 14040/44 dar. Das Projekt verdeutlicht, dass die Ökobilanz jedes einzelnen Produktsystems für sich steht und die Auswirkungen jedes Umweltaspekts gesondert zu betrachten sind und nicht für ganze Werkstoffgruppen pauschalisiert werden dürfen. Die Ergebnisse stellen Momentaufnahmen der Produktsysteme dar.

Jedes der Produktsysteme wies für die verschiedenen Umweltaspekte individuelle Stärken und Schwächen auf. Ein hoher Anteil nachwachsender Rohstoffe führt im Vergleich zu konventionellen Technologien in der Regel zu höheren Aufwendungen in den Vorketten und zu Verschiebungen in den Umweltwirkungen. So verursachen bspw. PVC-Weichmacher auf Basis nachwachsender Rohstoffe einen energetischen Mehraufwand gegenüber dem konventionellen PVC-Schaumkunstableder. Die Ökobilanz der beiden chromfrei gegerbten Leder ist mit einem signifikant höheren Flächenbedarf gegenüber dem Chromleder verbunden. Der Verzicht auf eine polymere Deckzurichtung wies in der Bilanz des untersuchten Anilinleders mit vegetabilen Gerbung einen vergleichsweise geringeren Energieverbrauch aus.

Die Cradle-to-Gate-Bilanzen zeigen, dass eine verbesserte Nachhaltigkeit nicht durch die Minimierung oder Maximierung eines einzigen Faktors, z. B. dem Austausch einer Komponente, erreicht werden kann, sondern durch viele Schritte entlang der gesamten Wertschöpfungskette beeinflusst wird. Des Weiteren wurde in einer Modellrechnung gezeigt, wie der Vergleich auf eine Cradle-to-Grave-Bilanz erweitert werden kann. Dabei wurden die Einflüsse von Design, Verarbeitung und die mittlere Nutzungsdauer berücksichtigt. Das Modell unterstreicht den starken Einfluss von Werkstoffqualität, Produktgestaltung und Verbraucherverhalten auf die Nachhaltigkeit eines Produkts über seinen gesamten Lebenszyklus. Die Bilanzierung von alternativen Trendsustituten wurde durch ein hohes Defizit an Daten zu Technologie, Gebrauchseigenschaften und der zu erwartenden Nutzungsdauer erschwert. Das Fehlen von industrieller Produktionslinien für Trendsustitute schränkt die Vergleichsmöglichkeiten ein. Die angefragten Anbieter sahen sich in der Regel nicht in der Lage, die beworbene Nachhaltigkeit ihrer Produkte durch valide Informationen zu untermauern. Das Vorhaben stellt hier eine Bringschuld bzgl. Herstellung und Gebrauchseigenschaften alternativer Trendsustitute fest.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
Inhaltsverzeichnis	4
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole	5
1 Anlass des Vorhabens.....	6
2 Ziel des Vorhabens	9
3 Arbeitsweise	9
4 Arbeitsschritte	11
5 Ergebnisse	12
5.1 Definitionen.....	12
5.1.1 Systemgrenzen	12
5.1.2 Definition der funktionalen Einheit.....	13
5.1.3 Allokationen und Abschneidekriterien.....	13
5.1.4 Fehleranalyse, Quellen, Sensitivität	17
5.2 Ergebnisse für Leder und Kunstleder	19
5.2.1 Sachbilanz Leder und Kunstleder	19
5.2.2 Energiebilanz Leder und Kunstleder.....	22
5.2.3 Umweltwirkungen Leder und Kunstleder	23
5.2.4 Carbon Footprint Leder und Kunstleder	28
5.3 Ergebnisse für Trends Substitute	29
5.3.1 Sachbilanz Trends Substitute	29
5.3.2 Energiebilanz Trends Substitute.....	30
5.3.3 Carbon Footprint Trends Substitute	30
5.4 Qualitätsvergleich der Produkte	30
5.5 Auswertung	34
5.5.1 Bewertung Rindleder.....	34
5.5.2 Bewertung PVC-Kunstleder	40
5.5.3 Bewertung Trends Substitute	43
5.6 Diskussion und Schlussfolgerungen	52
5.7 Kennzahlen und Produktregeln (PCR)	54
6 Öffentlichkeitsarbeit, Wissenstransfer und Critical Review.....	63
7 Danksagung	63
8 Kritische Prüfung	64
9 Literaturverzeichnis.....	66
10 Tabellensverzeichnis.....	68
11 Abbildungsverzeichnis.....	69
12 Verzeichnis der Anlagen	70

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole

1K	.....	Einkomponenten ...	LPG	.....	Liquefied petroleum gas
2K	.....	Zweikomponenten ...	LVMH	.....	Moët Hennessy – Louis Vuitton
A	.....	Fläche	M	.....	Modalwert
AP	.....	Arbeitspaket	MKW	.....	Mineralölkohlenwasserstoffe
Äq.	.....	Äquivalent	Nm ³	.....	Normkubikmeter
ASTM	.....	American Society for Testing and Materials	P80	.....	80%-Akkumulation
BAT	.....	Best available technique	PAE	.....	Polyamid-Epichlorhydrinharz
BK	.....	Butadien-Kautschuk	PCF	.....	Produkt carbon footprint
CF	.....	chromfrei	PCR	.....	Product category rules
CCF	.....	Corporate carbon footprint	PES	.....	<i>Polyester</i>
CFP	.....	Carbon footprint	PET	.....	Polyethylenterephthalat
CSB	.....	Chemischer Sauerstoffbedarf	PETA	.....	People for the Ethical Treatment of Animals
CSR	.....	Corporate social responsibility	PLA	.....	Poly lactide
CV	.....	Viskose	PU	.....	Polyurethan
E	.....	Modul	RAL	.....	Reichsausschuß für Lieferbedingungen
EMAS	.....	Eco management and audit scheme	RG	.....	Reingerbstoff
EVA	.....	Ethylvinylacetat	RTO	.....	Regenerative thermische Oxidation
F	.....	Kraft	SBG	.....	Sächsische Bildungsgesellschaft
F&E	.....	Forschung und Entwicklung	SBK	.....	Styrol-Butadien-Kautschuk
FAO	.....	Food and Agriculture Organization of the United Nations	TNV	.....	Thermische Nachverbrennung
FGL	.....	Forschungsgemeinschaft Leder e. V.	UBA	.....	Umweltbundesamt
GHS	.....	Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals	UV	.....	ultraviolett
GM	.....	Grünmasse	VDA	.....	Verband der Automobilindustrie
GWP	.....	Global warming potential	VDL	.....	Verband der Deutschen Lederindustrie
H-	.....	H-Sätze (Health)	VOC	.....	Volatile organic compounds
HF	.....	Hochfrequenz ...	WDA	.....	Wasserdampfaufnahme
Higg MSI	.....	Higg materials sustainability index	WDD	.....	Wasserdampfdurchlässigkeit
IHK	.....	Industrie und Handelskammer	WPC	.....	Wood plastic composite
IPCC	.....	Intergovernmental Panel on Climate Change	d	.....	Dicke
IPPC	.....	Integrated pollution prevention and control	m	.....	Masse
JBS S. A.	.....	José Batista Sobrinho Sociedade Anônima	Δ	.....	Differenz
KPI	.....	Key performance indicator	ε	.....	Deformation
KNV	.....	Katalytische Nachverbrennung	η	.....	Wirkungsgrad
LCA	.....	Life cycle assessment	ρ	.....	Dichte
LCI	.....	Life cycle inventory	σ	.....	Festigkeit, Normalspannung

Indizes

GHS-H	.....	GHS-Health-Datensätze ...
N	.....	Nutzung, Gebrauch ...
V	.....	Verschnitt ...
i	.....	Element ...
spez.	.....	spezifisch...
Σ	.....	Summe ...
∅	.....	Durchschnitt ...

1 Anlass des Vorhabens

Sowohl im Consumer- als auch im Bereich technischer Werkstoffe decken Leder und Kunstleder ein breites Produktspektrum ab. Bekleidung, Schuhwerk, Accessoires, Polstermöbel, Architektur und Fahrzeugbau benötigen diese Materialien. Sie erfahren deshalb große Aufmerksamkeit durch die Verbraucher. Mode, Preis und Markenprestige steuern das Einkaufsverhalten. Immer mehr Konsumenten achten aber auch auf die ökologische Qualität der Produkte, das soziale Engagement der Produzenten und die direkte Kommunikation mit den Anbietern /3/ /25/.

Viehzucht und Schlachtindustrie liefern weltweit den Hauptrohstoff für die Lederindustrie. Gegen den Verzehr von Fleisch und Fisch und für einen radikalen Tierschutz stehen Organisationen wie z. B. PETA (People for the Ethical Treatment of Animals) oder die französische L214-Bewegung (L214 Éthique & Animaux). Diesen bevorzugt in westlichen Industrieländern anzutreffenden Bewegungen steht ein rasant zunehmender Fleischverzehr in anderen Teilen der Welt gegenüber. Neben der traditionell karnivor geprägten Ernährung in Nord- und Südamerika explodierte innerhalb nur einer Dekade in Asien der Fleischkonsum um über 450 % /1/ /26/. Asien und speziell China stellen zudem die größten und jüngsten Konsumentengruppen für Luxusgüter, wie die Verkaufszahlen von Marken wie Kering, Hermes oder Moët Hennessy – Louis Vuitton SE (LVMH) zeigen /3/. Aber auch am Massenmarkt für Schuhe, Kleidung und Accessoires müssen sich die Anbieter vermehrt Fragen zu Ökologie und sozialer Verantwortung (ISO 26000 Corporate Social Responsibility CSR) stellen.

Werkstoffe aus Synthefasern gelten vegan lebenden Menschen als Alternative zu Leder, obwohl auch sie Umweltprobleme globalen Ausmaßes verursachen. Weltweit werden über $70 \cdot 10^6$ t Synthefasern pro Jahr produziert /8/. Die aus ihnen hergestellten Produkte bilden neben Reifenabrieb die Hauptquelle für den massenhaften Eintrag von Mikroplastik in die Weltmeere /8/. Die Woll- und Seidenwirtschaft steht aus ethischen Gründen ebenfalls unter Kritik; an ihrer statt werden vegetabile Ressourcen propagiert (Sojaseide, Baumwolle, Zellulose, Flachs, Jute). Der Anbau und die Gewinnung von Pflanzenfasern wiederum ist durch einen hohen Flächen-, Wasser- und Chemikalienverbrauch (Pestizide, Hilfsmittel) gekennzeichnet, schadet der Biodiversität (Monokulturen), verdrängt ähnlich wie andere Biopolymere (Biodiesel, Bioethanol) die lokale Nahrungsmittelerzeugung und provoziert die Vernichtung wertvoller Biotope. Umweltlabel und Produktzertifikate wollen hier den Kunden beraten und ökologische Auswahlkriterien anbieten.

Der Markt reagiert auf diese Trends mit einem veränderten Marketing und neuen Produkten. Neben den etablierten Werkstoffen werden Alternativen für Leder aber auch für Kunstleder angeboten und diese als modisch, innovativ, nachhaltig und vegan beworben.

Gern wird der Verzicht auf tierische Rohstoffe, die Verarbeitung nachwachsender vegetabilier Ressourcen oder die Verwertung von Abfällen und Nebenprodukten herausgestellt. Phantasievolle Produktnamen sagen jedoch wenig zu Herkunft, Herstellung und Zusammensetzung aus /4/.



Abbildung 1: Beispiele für trendige Ökoprodukte:

- 1) Piñatex aus beschichteten Non Wovens aus Bromeliacea (Ananasfaser)
- 2) "FlyLeather" - Kunstleder als Materialmix aus textilem Träger, Kunst- und Lederfasern
- 3) Echtes Rindleder mit färbender Gerbung auf Basis eines Rheumextraktes (Rhabarberwurzel)

Am Markt erscheinen Ledersubstitute, z. T. unter kreativen Wortschöpfungen und geschützten Marken, wie z. B. "vegan leather", "pineapple leather", "Piñatex®", "Apfelleder", "Eukalyptusleder", "NUVI Releaf", "FlyLeather™", "Mylo™", "Vegan Mycelium Leather", "Mirum®" "Muskin™", "VEGEA®¹", "Vegatex®", "SnapPap" u. a. m. (Abbildung 1). Substitute für Kunstleder werden mit den Attributen "chlorfrei", "weichmacherfrei", "PVC-frei" etc. versehen. Sie sollen aktuellen Trends folgend ein besonderes Lebensgefühl von Nachhaltigkeit und den Verzicht auf fossile Ressourcen vermitteln. Dabei stützen sich die Verkaufsargumente in erster Linie auf den Austausch (Trends substitut) oder auf die Verwendung einer ganz bestimmten Materialkomponente /13/. Dieser Art des Anpreises mangelt es in aller Regel an einer wissenschaftlichen Grundlage nach dem aktuellen Stand von Natur-, Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften.

Ökobilanzen nach DIN EN ISO 14040/44 bilden seit zwei Jahrzehnten das Werkzeug fundierter Analysen. Sie erfassen Teilabschnitte oder den gesamten Lebensweg eines Produktes (LCA). Sie stehen einer monokausalen Betrachtungsweise oder der Überbetonung von Teilaspekten entgegen.

¹ Vegan coated fabric

So zitierte die Europäische Kommission in ihrem IPPC-Dokument "Reference document on best available techniques for the tanning of hides and skins (BAT)", bereits im Jahre 2003 aus einer vergleichenden Ökobilanz zu Gerbverfahren für Möbelleder /10/ /20/:

"... the withholding or addition of a certain auxiliary material (tanning material) is not a sufficient criterion for an environmentally friendly or environmentally harmful evaluation of the product or the process. The project goes on to make it clear that environmental improvements can never be reached in all areas (waste water, sludge, waste) at the same time. ...

So, for any given leather article, knowledge in headline terms of the type of tanning used is not, in itself, a reliable indicator of its biological quality. An independent investigation of the detailed technologies applied and the manufacturing conditions prevailing will also be necessary if an environmental impact assessment is to be made in addition to an assessment of hygiene, pollutants and utility value."

Die Herstellung von Gebrauchsgütern aus Leder und Kunstleder, einschließlich der dafür benötigten Flächenwerkstoffe, findet häufig in kleinen und mittelständischen Unternehmen statt. Viele der Marktteilnehmer streben die Entwicklung nachhaltiger, ökologisch wertiger Produkte auf der Basis umweltschonender und gesundheitlich unbedenklicher Verfahren an, verfügen aber im Gegensatz zu großen Brands /19/ /27/ nicht über vergleichbare Marketing- bzw. F&E-Kapazitäten, um eine Ökobilanz zu erstellen. Die Kommunikation mit dem Kunden erreicht oft nicht das gewünschte Maß. Viele Dienstleister für ökologisches Management bieten ihren Service am Markt an und sind methodisch an den einschlägigen Standards geschult. Ihnen fehlt jedoch technologisches Wissen und die Kenntnis der industriellen Praxis. Aufgrund der monothematischen Ausrichtung ihres Geschäftsmodells und der Abhängigkeit vom industriellen Auftraggeber drohen Zielkonflikte und die Gefahr des Greenwashings.

2 Ziel des Vorhabens

Das Vorhaben realisierte eine vergleichende Ökobilanz zwischen Leder, Kunstleder und alternativen Trendsustituten für das Anwendungsgebiet Möbelbezugsmaterialien und folgte dabei den Vorgaben der DIN EN ISO 14040/44. Die Vergleiche konzentrierten sich auf die Nachhaltigkeit der Werkstoffe. Die praktische Projektarbeit stützte sich auf eine branchenübergreifende Zusammenarbeit. Projektteilnehmer waren zwei mittelständische Unternehmen und eine unabhängige Industrieforschungseinrichtung. Mit der Erstellung der Ökobilanzen wurde zugleich eine der Zielstellung entsprechende Methode entwickelt. Die Arbeit soll allgemein verständliche Informationen für interessierte Verbraucher bieten und Unternehmen des produzierenden Gewerbes beim Thema Nachhaltigkeit Hilfestellung leisten. Grundlage dafür sollten belastbare Daten und Benchmarks, Angaben zu Ressourcen, Standorten, Prozessen und Produktqualitäten sein, wie sie nur durch eine Ökobilanz bereitgestellt werden können.

3 Arbeitsweise

Der innovative Ansatz des Vorhabens beruhte auf drei wesentliche Strategien:

- 1) Ökopprofile oder Umweltproduktdeklarationen benötigen verifizierte Daten von unabhängiger Seite. Dazu müssen aufwendige Ökobilanzen (LCA) erarbeitet werden. Diese leiden häufig unter ihrem Anspruch, weit gesteckte Bilanzräume zu 100 % abbilden zu wollen. Bei komplexen Prozessen wird davon ausgegangen, dass bereits ein Produkt bis zu über 10^5 Datenpunkte zur vollständigen Modellierung benötigt /9/. Alle Faktoren gleichermaßen zu berücksichtigen, setzt eine ideale Informationslage und nahezu unbegrenzte Ressourcen voraus. Deshalb droht in der Praxis die Gefahr, dass essentielle Faktoren ungenügend Berücksichtigung finden und marginalen Faktoren eine übertriebene Aufmerksamkeit zu Teil wird. Dieser Zielkonflikt wurde durch die Anwendung des Pareto-Prinzips² gelöst. Dieses nichtlineare Ungleichgewicht, auch als 80/20-Regel bekannt, lässt sich in Natur und Wirtschaft nachweisen. Dabei gilt es zu beachten, dass sich seine Gültigkeit nur auf voneinander weitgehend unabhängige Elemente eines Systems entfaltet. Als empirisch begründete Methode auf das Vorhaben angewandt galt, dass rund 20 % aller Faktoren für etwa 80 % ökologische Wirkungen verantwortlich zeichnen. Umgesetzt wurde dieses Prinzip als P80-Akkumulation in der Bilanzierung der Vorketten (upstream). Dabei wurden alle Rohstoffe und Hilfsmittel des Kernprozesses einbezogen, welche im absteigenden Ranking ihrer spezifischen Einsatzmenge kumulativ mindestens die 80 %-Grenze der eingesetzten Gesamtmenge einschlossen bzw. überschritten. Das Projekt zeigte,

² Vilfredo Pareto (Taufname Fritz Wilfrid Pareto) *1848 Paris †1923 Céligny, 1893 – 1911 Prof. für Wirtschaftswissenschaften in Lausanne, Statistische Arbeiten zu Versicherungsmathematik und Einkommensverteilung ("Pareto-Gesetz", Pareto-Optimum, Pareto-Verteilung) <https://asana.com/de/resources/pareto-principle-80-20-rule> Stand: 11.11.2022

dass diese Bedingung mit $\leq 20\%$ aller Rezepturkomponenten erfüllt wurde. Vorteil dieser Herangehensweise ist es, dass eine Aufgabenstellung dieser Komplexität auch mit einem kleinen Budget gelöst werden kann (Anlage 1).

- 2) Das Vorhaben nahm konkreten Bezug auf Produkte der Kooperationspartner. Angelehnt an die Idee der EMAS-Kernindikatoren (KPI) zielte das Projekt auf Prozesse und Faktoren mit der höchsten Umweltrelevanz. Dabei wurden verschiedene Werkstoffe gleicher Verwendung betrachtet. Sie unterscheiden sich in ihren Herstellungstechnologien deutlich. Ein identisches Bewertungsraster auf die gleiche funktionale Einheit angewandt, wäre wenig praktikabel und mit dem Risiko verzerrter Aussagen verbunden, weshalb die unter Punkt 1) genannte Methode entwickelt wurde. Besonders wichtig war die Deckungsgleichheit des Anwendungsgebiets, da dies erst ein sinnvolles Vergleichen zuließ.
- 3) Ein weiteres Novum des Vorhabens bestand in der Kooperation von zwei Produzenten unterschiedlicher Werkstoffgattungen, die durch eine dritte Partei moderiert wurde. Diese konstruktive Auseinandersetzung mit dem Thema ließ eine hohe fachliche Kompetenz, Ausgewogenheit und Objektivität zu. Als Partner für das Projekt konnten zwei in Deutschland ansässige mittelständische inhabergeführte Unternehmen gewonnen werden, welche den fortgeschrittenen Stand der Technik (BAT) ihrer Branchen repräsentieren, beide über eine Zertifizierung nach ISO 9001, ISO 14001, ISO 50001 bzw. EMAS (EG-VO 1221/2009) verfügen und ein transparentes, der Öffentlichkeit zugewandtes Umweltmanagement pflegen. Die FILK Freiberg Institute gGmbH als moderierende Institution steht in einer über 130-jährigen Tradition von Forschung und Lehre und agiert in verschiedenen, sehr breit gefächerten Arbeitsgebieten, welche u. a. die Leder- und Kunstlederherstellung, Biopolymere, Molekularbiologie, Medizin- und Umwelttechnik, Ökobilanzen, Gutachten und ein akkreditiertes Prüfwesen einschließen. Der detaillierte Vergleich von Werkstoffen mit identischer Verwendung aber grundverschiedenen Technologien, wurde in dieser Art und Weise erstmalig besprochen. Dadurch erwuchs eine lebhafteste, konstruktive und von hohem Sachverstand geprägte fachliche Diskussion. Anbieter von marktverfügbaren Trendsustitute u. a. Industriepartner wurden als externe Kooperationspartner angefragt und auf Wunsch in das Vorhaben einbezogen.

4 Arbeitsschritte

Eine vollständige Produktökobilanz nach DIN EN ISO 14040/44 bezieht sich auf Umweltaspekte und potentielle Umweltwirkungen über den gesamten Lebensweg eines Produktes. Das Vorhaben widmete sich einer vergleichenden Produkt- und Verfahrensökobilanz für weiche Flächenwerkstoffe. Konkret wurden Leder aus Großviehhäuten und PVC-Kunstleder als Rollenware gegenübergestellt. Zudem wurden Beispiele für Trends Substitute, welche häufig als "vegane Alternativprodukte" angesehen werden, einbezogen. Die Sachbilanzen konzentrierten sich auf gerbereitechnische Prozesse von der Rohware bis zum Fertigleder bzw. alle Streich- und Beschichtungsprozesse vom textilen Träger bis zum fertigen PVC-Kunstleder. Innerhalb der Sachbilanzen wurden außerdem die Ressourcenlage, Vorketten sowie die Produktqualität untersucht.

Durch die Projektpartner war es möglich, auf Produktionsangaben und Daten des betriebseigenen Umweltmanagements (ISO 14001) zurückzugreifen und den Vergleich an konkreten Beispielen zu führen. Das Vorhaben unterteilte sich in 10 Arbeitspakete (Tabelle 1).

Tabelle 1: Arbeitspakete des Vorhabens

AP	Aktivitäten der Arbeitspakete
01	Zieldefinition, Systemgrenzen und Umweltaspekte
02	Stoffliche Sachbilanz
03	Energetische Sachbilanz
04	Produktsachbilanz
05	Wirkungsabschätzung zur stofflichen Sachbilanz
06	Wirkungsabschätzung zur energetischen Sachbilanz
07	Entwicklung umweltspezifischer Kennzahlen (KPI) ³
08	Betrachtung Trends Substitute, Gesamtvergleich
09	Vorschläge für Produktkategorieregeln (PCR)
10	Berichtslegung, Publikation, Wissenstransfer, Critical Review

³ Key Performance Indicators KPI

5 Ergebnisse

5.1 Definitionen

5.1.1 Systemgrenzen

Die Fa. Vowalon Beschichtung GmbH produziert Kunstleder und beschichtete Textilbahnen aller Art. Die Rohstoffbasis ist heterogen. Textile Träger, polymere sowie anorganische Hilfsmittel fließen in die Herstellung ein. Die Technologie ist flexibel und gestattet es, sowohl fossile als auch nachwachsende Rohstoffe sowie Recyclate einzusetzen. Zwei Produkte aus der Gruppe der PVC-Kunstleder wurden für die Erstellung von Ökobilanzen ausgewählt:

1) Polsterkunstleder P3392P Typ VOWAled Pisa	universelles PVC-Schaumkunstleder Träger PES/CV-Maschenware
2) Polsterkunstleder F3347AP Typ VOWAled Palm Beach	PVC-Schaumkunstleder, auch für Fahrzeuginterieur, Träger PES-Krepp, Maschenware, Weichmachergemisch auf Basis nachwachsender Rohstoffe

Das Produkt VOWAled Pisa nutzt einen textilen Träger, welcher zu 35 % biopolymere Fasern enthält. Das Produkt VOWAled Palm Beach enthält Weichmacher, welche sich in ihrer Synthese auf nachwachsende Rohstoffe stützen. Das Produkt erreicht damit einen biobasierten Anteil von ca. 50 %. Beide Produkte stellen Schaumkunstleder dar, welche im Streichverfahren hergestellt werden.

Die HELLER-Leder GmbH & Co. KG produziert vornehmlich Möbel- und Automobilleder aus bovinen Großviehhäuten. Für den Einsatzzweck Polsterleder wurden die folgenden drei Artikel ausgewählt:

1) Möbelleder Blattwerk®	Vegetabilgerbstoffe in der Hauptgerbung unter Verwendung eines gerbfähigen Olivenblattextrakts, Leder mit Semianilinzurichtung
2) Möbelleder On Stage! CF	Chromfreie Gerbung mit vegetabilen und synthetischen Gerbstoffen, Vorgerbung mit Glutardialdehyd, Leder mit gedeckter Zurichtung
3) Möbelleder Classic	Chrom-III-Salze in der Hauptgerbung, Nachgerbung mit synthetischen und vegetabilen Gerbstoffen, Leder mit gedeckter Zurichtung

Die Hauptmatrix jedes Leders, die tierische Haut, stellt in Gänze einen nachwachsenden Rohstoff dar. Eine Vielzahl der eingesetzten Hilfsmittel stützen sich ebenfalls auf Bioressourcen wie z. B. vegetabile Gerbstoffe oder pflanzliche oder tierische Fette und Öle. Für das Produkt Blattwerk werden zur Gerbung hauptsächlich vegetabile Gerbmittel sowie für die Vorgerbung ein spezieller aus Olivenblättern gewonnener wässriger Extrakt verwendet. Die Rohstoffbasis dieses Gerbstoffs bilden Beschnitt und Ernterückstände aus mediterranen Olivenbaumpflanzungen.

Für das Produkts On Stage! CF werden u. a. ein vegetabile Gerbmittel und -extrakte sowie synthetische Gerbstoffe verwendet. Das Kürzel CF steht für chromfrei. Das Classic-Leder basiert auf einer konventionellen Chromgerbung, ergänzt durch vegetabile und synthetische Gerbstoffe in der Nachgerbung.

Die Systemgrenzen definieren, welche Abschnitte im Lebenszyklus eines Produkts in die Betrachtung einfließen. Für das Vorhaben wurden die Systemgrenzen in drei Bereiche unterteilt (s. Abbildung 2 und Abbildung 3). Der Kernbereich (Systemgrenze 1) beinhaltet die Produktion am Standort. Der erweiterte Bereich umschloss alle Vorketten der Produktion (Systemgrenze 2) im Sinne einer "Cradle to Gate"-Analyse. Der dritte Bereich reichte von der Verarbeitung der Materialien bis zu ihrer Nutzung und Entsorgung als Konsumgut (Systemgrenze 3). Dieser Abschnitt wurde zu einer Cradle-to-Grave-Analyse ausgeweitet (s. Kapitel 5.6). Der Vergleich der Produkte bezog sich auf die Verwendung als Möbelbezugsmaterialien.

5.1.2 Definition der funktionalen Einheit

Durch die Unterschiede in den Technologien der gewählten Materialien lagen keine äquivalenten Produktsysteme vor. Damit waren vergleichende Aussagen auf der Basis abschnittsweiser Sachbilanzen ohne Wirkungsabschätzungen unzulässig. Vielmehr war die Erstellung einzelner Bilanzen für jedes Produkt auf der Grundlage einer einheitlichen funktionalen Einheit und einem identischen Verwendungszweck geboten.

Als funktionale Einheit für die Cradle-to-Gate-Analyse wurden **100 m² Möbelbezugsmaterial** gewählt und in der Cradle-to-Grave-Analyse alle Umweltwirkungen auf **ein Jahr Nutzungsdauer** unter Bezug auf die mittlere Nutzungsdauer transformiert (s. Kapitel 5.6). Da in der Lederproduktion sehr viele Hilfsmittel als wässrige Zubereitungen angeliefert werden, wurde hier als Bezugsgröße stets die Trockensubstanz (TS) herangezogen. Davon ausgenommen blieb die tierische Rohhaut, da Wasser ein natürlicher Bestandteil dieses Rohstoffs darstellt und auf sehr unterschiedliche Weise als "Bulk"-Wasser (Tropfwasser), kapillar, inter- und intrafibrillär sowie molekular gebunden in der Hautmatrix vorliegt. Die Ökobilanz bezog sich im konkreten Fall auf gekühlte Rohware. Primärenergieträger wurden dann gesondert bilanziert, wenn Sie stofflich verwertet wurden (z. B. zu Synthesezwecken).

5.1.3 Allokationen und Abschneidekriterien

Eine Allokation in einer Ökobilanz bezeichnet die Art der Zuordnung von Umweltlasten bei verzweigten Herstellungsprozessen unter Entstehung von Koppelprodukten. Die Aufteilung kann nach Masse, Stöchiometrie, Preis u. a. m. erfolgen. Das Vorhaben folgte dem massebezogenen Ansatz bzw. den Allokationen der genutzten Quellen. Abschneidekriterien entscheiden darüber, ob und welche Stoffströme in der Bilanz abgetrennt werden können. In Ökobilanzen werden Prozesse, deren Masseanteil und Pri-

märenergieverbrauch eine Schwelle von $\leq 5\%$ pro Lebenszyklusabschnitt unterschreiten, üblicherweise vernachlässigt. Für das Vorhaben wurde als Abschneidekriterium für die Analyse Cradle-to-Gate (Systemgrenzen 2) die in Kapitel 3 beschriebene Methode der P80-Akkumulation auf die Kernprozesse und Vorketten angewandt. Hilfsmittel der Kernprozesse, welche aufgrund ihrer geringen Einsatzmenge unberücksichtigt blieben, wurden aber in einem zusätzlichen Schritt in eine vereinfachte Dosis-Risiko-Analyse aufgenommen.

Für den Begriff Nachhaltigkeit existiert außerhalb seiner ursprünglich forstwirtschaftlichen Deutung /5/ kein einheitliches Verständnis wie z. B. seine Anwendung auf eine "grünen Logistik" /14/. Hilfs- und Rohstoffe für die Leder-, Textil- und Kunststoffindustrie werden weltweit transportiert und umgeschlagen. Ein permanenter Wechsel bei den Transportrouten, -mitteln und Lieferketten, verbunden mit einer Vielzahl an Allokationen, hervorgerufen durch nach Masse, Volumen oder Stückzahl gemischter Transporte, bestimmen die Gegenwart. Die Folgen der Coronapandemie 2020/21 führten vor Augen, dass abrupte Veränderungen in den weltweiten Warenströmen in kürzester Zeit eintreten können. Die Bilanzierung von Transportpfaden hätte für dieses Vorhaben eine nicht existente Informationslage vorgetäuscht und zu einer Unschärfe hinsichtlich des Projektziels geführt. Zur besseren Verdeutlichung ressourcen- und technologisch bedingter Unterschiede zwischen den Produktsystemen wurde deshalb auf die **Bilanz von Transportprozessen** verzichtet. Bewegungen von Fahrzeugen wurden dann berücksichtigt, wenn sie essentieller Bestandteil der Herstellung sind (z. B. Einsatz von Landmaschinen).

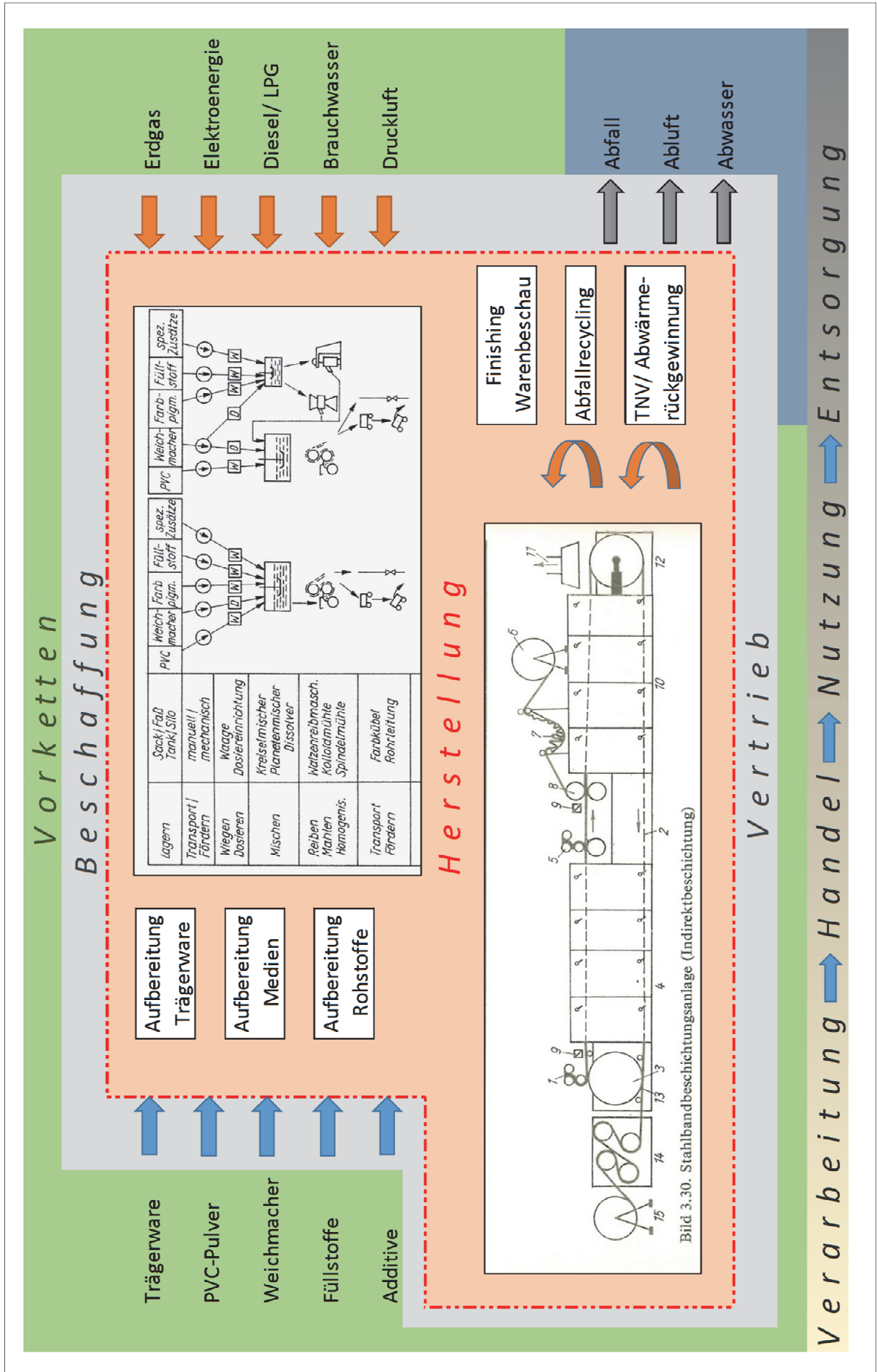


Abbildung 2: Systemgrenzen Ökobilanz PVC-Kunstleder (Bildquelle Mischerei und Stahlbandbeschichtungsanlage aus Wissenspeicher Leder, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1979)

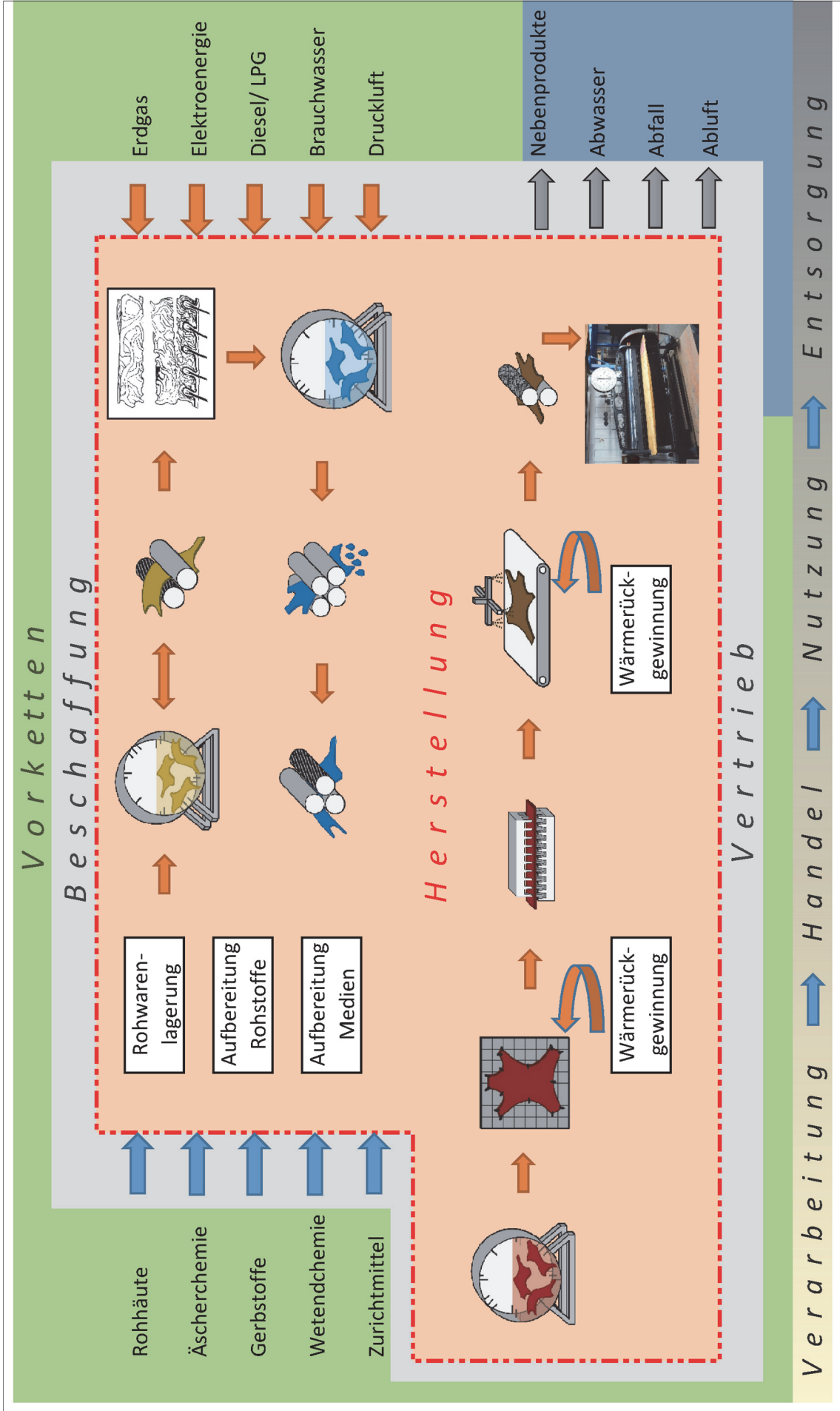


Abbildung 3: Systemgrenzen Ökobilanz Rindleder

5.1.4 Fehleranalyse, Quellen, Sensitivität

Der Wunsch, mit einer vergleichenden Ökobilanz die Wirklichkeit nach einem vorgegebenen Schema bzw. einem Modell möglichst genau abzubilden, verlangt das Messen und Erfassen vieler Parameter. Sie treten naturgemäß in sehr unterschiedlicher Variabilität auf. Wird dieser Prozess als eine Messaufgabe verstanden, so bedeutet die statistische Zuverlässigkeit einer Ökobilanz, sprich Reliabilität⁴, das Verhältnis zwischen wahren und beobachteten ökologischen Wirkungen. Die Daten werden dabei stets von unsystematischen Einflüssen wie zeitlich begrenzten Störfaktoren oder zufälligen Ereignissen beeinflusst.

Mit zunehmender Komplexität wächst die Zahl der Faktoren. Die daraus folgende Akkumulation von Fehlern pflanzt sich in den Berechnungen fort. Sie übertragen sich in der Regel nichtlinear /7/. Die Aussagekraft von Vergleichen sinkt, die statistische Zuverlässigkeit als Gütekriterium verschlechtert sich. Das Ziel eines besseren Verständnisses unterschiedlicher ökologischer Qualitäten wird bei einem hohen Verflechtungsgrad so komplex, dass die Modelle an ihre Grenzen stoßen und trennscharfen Vergleichen im Wege stehen /29/. Das Ergebnis eines Vergleiches leitet sich nicht zuletzt aus individuellen Randbedingungen der Entscheidungen ab, die wissenschaftlich oft nicht zu erschließen sind. Eine Überdehnung der Systemgrenzen und das Streben nach einer maximalen Kontrolle über "alle" Einflussparameter garantieren kein aussagekräftiges Ranking, sondern entspringen eher planwirtschaftlichen Denkkategorien.

Die Anwendung analytischer Methoden zur Bestimmung von Unsicherheiten, welche sich auf die mathematische Berechnung der Fehlerfortpflanzung stützen, scheitern an der Komplexität der Aufgabe und sind auch in Softwarepaketen oder in Datenbanken für Ökobilanzen praktisch nie anzutreffen. Eine gesteigerte Komplexität tendiert zu zusätzlichen Fehlern. Verfahren von geringerer Komplexität senken die Anzahl an Fehlern, welche durch Unsicherheiten auftreten /9/.

Die Arbeitsschritte für eine Ökobilanz stützen sich auf eine Vielzahl von Input- und Output-Daten und Simulationsansätzen, die mit dem Produkt verbunden sind. Sie sind wie alle Daten mit Unsicherheiten behaftet, die systematischer oder zufälliger Natur sein können. Wesentliches Merkmal komplexer nichtlinearer Systeme ist die damit verbundene Schwierigkeit der Vorhersage. Ökobilanzen mit sehr weit gesteckten Systemgrenzen neigen dazu, Arbeitsschritte zu vernachlässigen, die als unwichtig oder in ihrer Bearbeitung als unbequem empfunden werden. Dies begünstigt die Akkumulation von Fehlern, die sich in der Regel ebenfalls nichtlinear fortschreiben /7/.

⁴ Maß für die formale Genauigkeit bzw. Verlässlichkeit einer wissenschaftlichen Messung

Aus den genannten Gründen wurde das Konzept verfolgt, die gestellte Aufgabe durch Reduktion zu vereinfachen, betriebs- und prozessorientierte Formen von Ökoaudits mit der Produktbewertung zu verzahnen und deren Transparenz und Präzision zu verbessern. Durch die Projektpartner und die eigene Fachexpertise war für die Kernprozesse (Systemgrenzen 1) eine hohe Datensicherheit gegeben. In Richtung der Systemaußengrenzen (s. Abbildung 2 und Abbildung 3) musste eine zunehmende Datenunsicherheit hingenommen werden, da sich die Ergebnisse auf Recherchen stützten. Dies betraf insbesondere die Vorketten (Systemgrenzen 2).

Für die Recherchen wurden frei zugängliche Quellen genutzt. Dazu zählten die EU-Veröffentlichungen zum bestverfügbaren Stand der Technik (BAT-Dokumente), die ProBas Release-Datenbank des Umweltbundesamtes Dessau, das "Life cycle inventory (LCI) methodology and product category rules (PCR) for uncompounded polymer resins and reactive polymer precursors" des Verbandes der Kunststoffherzeuger in Deutschland PlasticsEurope Deutschland e. V. sowie eigene Forschungsergebnisse der FILK Freiberg Institute gGmbH und deren Bibliothek und Archiv. Die Quellen selbst zeigen, dass insbesondere bei der Ermittlung des Ressourcenbedarfs und der Umweltfrachten hohe Spannweiten auftreten, die in der Regel zu einer Variabilität im zweistelligen Prozentbereich führen. Daraus folgen Unsicherheiten in der Modellierung, in den Allokationen und Abschneidekriterien sowie in den geographischen und zeitlichen Bezügen. Diese sind in der Regel in den benutzten Dokumenten dargelegt.

Ein besonderes Problem stellte die Beschaffung von Daten zu alternativen Trendsustituten dar. Von den zahlreich angefragten Anbietern und Herstellern war mit Ausnahme der Fa. NUVI Relaf GmbH Frankfurt/M. niemand bereit oder in der Lage, Auskünfte zu erteilen. Deshalb konnte nur auf die Eigendarstellung der Anbieter in den Medien, die Fachliteratur, auf ingenieurwissenschaftlichen Standardwerke und Erfindungsbeschreibungen zurückgegriffen werden, um Modelle der Prozesse und darauf aufbauend Produktökobilanzen Cradle-to-Gate zu erstellen.

Ergebnisse zu Betrachtungen der Sensitivität von Einflussfaktoren wurden als Anlage 14 dem Bericht beigelegt. Die Berechnungen beschränkten sich stichprobenartig auf Einzelparameter.

5.2 Ergebnisse für Leder und Kunstleder

5.2.1 Sachbilanz Leder und Kunstleder

Ausgangspunkt der Sachbilanz jedes Produktsystems war die P80-Akkumulation der im Kernprozess entsprechend der Rezepturierung eingesetzten Hilfsmittel und Rohstoffe (Tabelle 2 - Tabelle 6), welche nachfolgend zu der Betrachtung der Vorketten für eine Analyse Cradle-to-Gate führten. Die prozentualen Angaben in Spalte 1 der Tabellen zur P80-Akkumulation beziehen sich auf die Summe aller gemäß Rezeptur eingesetzten Rohstoffe und Hilfsmittel des Kernprozesses. In Summe erfüllen sie die Bedingungen, $\geq 80\%$ der Gesamteinsatzmenge auf sich zu vereinen. Im konkreten Fall wurde Calciumcarbonat als ein für Kunstleder typischer und in erheblichen Mengen eingesetzter Füllstoff zusätzlich in die Bilanz aufgenommen und so eine Akkumulation von $\approx 90\%$ erreicht (Tabelle 2 und Tabelle 3).

Tabelle 2: P80-Akkumulation Kernprozess PVC-Kunstleder VOWAled Pisa

Input - Kernprozesse PVC-Kunstleder			
E-PVC-Pulver (Emulsionspolymerisation)	37 %	23	kg·100 m ⁻²
Weichmacher Dioctylterephthalat	25 %	16	kg·100 m ⁻²
Maschenware, 65 % PES/ 35 % CV	15 %	9	kg·100 m ⁻²
Calciumcarbonat synthetisch gefällt	12 %	8	kg·100 m ⁻²
	Σ	89 %	

Tabelle 3: P80-Akkumulation Kernprozess PVC-Kunstleder VOWAled Palm Beach

Input - Kernprozesse PVC-Kunstleder			
E-PVC-Pulver (Emulsionspolymerisation)	42 %	30	kg·100 m ⁻²
Weichmachergemisch	35 %	25	kg·100 m ⁻²
Maschenware, 100 % PES-Krepp	12 %	8	kg·100 m ⁻²
Calciumcarbonat synthetisch gefällt	5 %	3	kg·100 m ⁻²
	Σ	94 %	

Die Herstellung der Kunstleder basiert auf der Beschichtung textiler Träger mit PVC-Pasten nach dem Streichverfahren. Der Prozess wird kontinuierlich von-Rolle-zu-Rolle in mehreren präzisen Aufträgen ausgeführt. Die Umwandlung der Streichmassen (PVC-Paste) in Weich-PVC erfolgt thermisch, wobei das Lösevermögen des PVC-Korns im Weichmacher und die Stärke nebensvalentiger Bindungen beider Komponenten nach dem Gelierprozess die entscheidende Rolle spielen. Die Entfaltung der PVC-Moleküle aus dem Primärkorn sowie der Dispersionsgrad weiterer Sekundärweichmacher, Additive und Füllstoffe bestimmen wesentlich die Qualität eines Kunstleders. Der Einsatz von Treibmitteln bewirkt die Ausbildung einer Schaumschicht mit definierter Porosität im Werkstoffquerschnitt.

Alle für die Sachbilanzen notwendigen rezepturellen und technologischen Informationen wurden durch die Vowalon Beschichtung GmbH aufbereitet zur Verfügung gestellt (Anlagen 8 und 9).

Die Produktion von Möbelleder aus Großviehhäuten bildet einen stark untergliederten Prozess, der überwiegend als Batchbetrieb (Gerbfässer) durchgeführt wird. In der sogenannten Wasserwerkstatt werden die angelieferten Häute weitestgehend von allen nichtkollagen Bestandteilen (Schmutz, Bindegewebe, Keratin, unstrukturierte Eiweiße, Naturfett) befreit und in einen gerbfähigen Zustand (Blöße) versetzt. Der Hauptgerbung folgt die sogenannte Nasszurichtung, in der das Halbfabrikat (Wet-Ware) nachgerbt, gefettet und gefärbt wird. In der Zurichtung erhält das Leder eine für den Verwendungszweck angepasste Oberflächenveredelung. Parallel dazu wird das Material einer schrittweisen Dickenregulierung und anderen mechanische Bearbeitungen (Walken, Stollen, Millen) unterzogen.

Tabelle 4: P80-Akkumulation Kernprozess HELLER-Leder Blattwerk

Input - Kernprozesse Rindleder			
Äquivalentmenge Rohware (GM)	65 %	702	kg·100 m ⁻²
Vegetabile Gerbstoffe	9 %	97	kg·100 m ⁻²
Natriumchlorid	5 %	54	kg·100 m ⁻²
synthetische Gerbstoffe	5 %	51	kg·100 m ⁻²
Kalkhydrat	5 %	51	kg·100 m ⁻²
	Σ	89 %	

Tabelle 5: P80-Akkumulation Kernprozess HELLER-Leder Onstage! CF

Input - Kernprozesse Rindleder			
Äquivalentmenge Rohware (GM)	83 %	687	kg·100 m ⁻²
Vegetabile Gerbstoffe	3 %	27	kg·100 m ⁻²
Natriumchlorid	3 %	24	kg·100 m ⁻²
Kalkhydrat	2 %	19	kg·100 m ⁻²
	Σ	91 %	

Tabelle 6: P80-Akkumulation Kernprozess HELLER-Leder Classic

Input - Kernprozesse Rindleder			
Äquivalentmenge Rohware (GM)	79 %	636	kg·100 m ⁻²
Natriumchlorid	4 %	32	kg·100 m ⁻²
Chromgerbstoff	3 %	21	kg·100 m ⁻²
Kalkhydrat	2 %	16	kg·100 m ⁻²
	Σ	88 %	

Kalkhydrat stellt ein essentielles Hilfsmittel der Wasserwerkstatt dar. Seine Herstellung ist mit einem hohen spezifischen Energieverbrauch verbunden. Darum wurde dieses Hilfsmittel zusätzlich in die P80-Akkumulation aufgenommen (s. Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6). Die Sachbilanz erreichte dadurch rund 90 % der eingesetzten Hilfsmittel.

Alle für die P80-Akkumulation notwendigen rezepturellen Angaben wurden durch die HELLER-Leder GmbH & Co. KG in aufbereiteter Form bereitgestellt (Anlagen 2, 4 und 6). Bei allen drei Lederarten bildet die Haut mengenmäßig die Hauptkomponente der Rezepturierung. Für die Betrachtung der Kernprozesse wurde ein stationärer Betrieb ohne abweichende Produktionsbedingungen oder Störfälle unterstellt. Im Ergebnis der Cradle-to-Gate-Analyse wurden die stofflichen Ressourcenverbräuche (upstream) hergeleitet.

Tabelle 7 listet die spezifischen Verbräuche an Rohstoffen, Wasser und Flächen der 5 Produktsysteme und beinhaltet zugleich die für das Vorhaben ausgewählten ressourcenbezogenen Umweltaspekte.

Tabelle 7: P80-Werte für den Ressourcenverbrauch (Cradle-to-Gate)

Ressource		VOWAled Pisa	VOWAled Palm Beach	HELLER-Leder Blattwerk	HELLER-Leder Onstage! CF	HELLER-Leder Classic	Einheit
petrochemische Rohstoffe	≥	42	185	71	⁵	⁵	kg·100 m ⁻²
mineralische Rohstoffe	≥	32	48	277	176	199	kg·100 m ⁻²
nachwachsende Rohstoffe	≥	7	66	1.035	758	636	kg·100 m ⁻²
Fläche (Agrar, Forst, Bergbau)	≥	0,005	21	8.650	8.366	607	m ² ·100 m ⁻²
Biozideinsatz	≥	⁵	0,03	3	3	0,3	kg·100 m ⁻²
Wasserver- brauch	≥	9	17	49	32	28	m ³ ·100 m ⁻²

Die fehlenden Angaben zu petrochemischen Rohstoffen der Leder Onstage! CF und Classic und zum Biozideinsatz für das Kunstleder VOWAled Pisa in Tabelle 7 leiten sich aus den gesetzten Regeln des Cut-offs (P80-Akkumulation) der Ökobilanz ab. Hilfsmittel und deren Synthesepfade (Vorketten), welche dieser Regel unterlagen, wurden nicht in die Bilanz aufgenommen.

Die Markierung der Daten jeder Zeile mit dem mathematischen Größer-Gleich-Zeichen ≥ ist der Methode der P80-Akkumulation geschuldet und bedeutet, dass die wahren Werte für den Bilanzrahmen Cradle-to-Gate mit hoher Wahrscheinlichkeit nahe bzw. oberhalb der berechneten Modellwerte angesiedelt sind. Im Gegensatz dazu bieten die Daten der Kernprozesse eine deutlich höhere Zuverlässigkeit, da sie durch die Kooperationspartner bereitgestellt wurden und dem aktuellen Herstellungsprozess entstammen. Die Recherchen und Ableitungen zu den Sachbilanzen für jeden einzelnen Produktpfad der Vorketten sind in den Anlagen 5, 7, 8, und 9 niedergelegt.

⁵ s. Kap. 3 Seite 9f und Kap. 5.1.3 Seite 13f bzgl. der gewählten Arbeitsmethode und den Regeln zum Cut-off

5.2.2 Energiebilanz Leder und Kunstleder

Der Energieeffizienz kommt bei allen Produktsystemen eine zentrale ökologische und volkswirtschaftliche Rolle zu. Energie kann gespeichert und von einer Form in eine andere umgewandelt werden (1. Hauptsatz der Thermodynamik) und dabei Arbeit mit einem Wirkungsgrad $\eta < 1$ verrichten. Energieumwandlung und -transport sind mit einer Entwertung d. h., Verlust der Fähigkeit Arbeit zu verrichten, verbunden. Energieressourcen und die Formen ihrer Bereitstellung stellen gegenüber der Frage der Energieeffizienz ein eigenständiges Thema dar. Die Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Verbrauch fossiler Primärenergieträger wird als die Herausforderung des 21. Jahrhunderts angesehen. Deshalb wurde an dieser Stelle auf eine Ökonomie der Energieträger bei der Ermittlung der spezifischen Energieverbräuche verzichtet. Dieser Aspekt findet unter dem Thema Carbon Footprint in den Kapiteln 5.2.5 und 5.3.3 seine Entsprechung, welches das Verhältnis der Inanspruchnahme fossiler zu anderen Energiequellen als globales Erwärmungspotential (GWP-Index) beschreibt. Seine Definition und die Quantifizierung in CO₂-Äquivalente folgt den Festlegungen des Zwischenstaatlichen Forums für Klimawandel (IPCC), welches in seinem Kyoto-Protokoll von 1997 anthropogene Treibhausgase⁶ definiert. Deren Emissionen können einer CO₂-normierten Verrechnung unterzogen werden. Dabei wird das Treibhausgaspotential des betrachteten Gases in Relation zu CO₂ gesetzt und die angenommene mittlere Verweilzeit in der Atmosphäre, bezogen auf einen 100-Jahreszeitraum, berücksichtigt. Die dazu notwendigen Koeffizienten können dem jeweils aktuellen Sachstandsbericht (IPCC Assessment Report) entnommen werden⁷. Wird die Berechnung von Äquivalenten auf einen konkreten Prozess, ein Produkt, ein Unternehmen, eine Organisation etc. angewandt, bildet das Ergebnis den CO₂-Fußabdruck (CFP) ab. Er wird als ökologische Maßzahl genutzt. Die nachfolgenden Tabellen der spezifischen Energieverbräuche sind nach Produkt und Systemgrenze aufgeschlüsselt. Ihre Recherche und Berechnung sind in den Anlagen 2 – 9 zusammengefasst.

Tabelle 8: Spezifischer Energieverbrauch der Kernprozesse

	VOWAled Pisa	VOWAled Palm Beach	HELLER-Leder Blattwerk	HELLER-Leder Onstage! CF	HELLER-Leder Classic	Einheit
=	619	875	2.709	3.447	3.447	MJ·100 m ²
=	2	2	8	10	10	kWh·m ⁻²

Tabelle 9: P80-Werte für den spezifischen Energieverbrauch Cradle-to-Gate

	VOWAled Pisa	VOWAled Palm Beach	HELLER-Leder Blattwerk	HELLER-Leder Onstage! CF	HELLER-Leder Classic	Einheit
≥	2.771	9.991	3.555	3.823	5.176	MJ·100 m ²
≥	8	28	10	11	14	kWh·m ⁻²

⁶ Anthropogene Treibhausgase gemäß Kyoto-Protokoll: CO₂ (Referenzgas), CH₄, N₂O, H-FKW/HFC, FKW/PFC, SF₆

⁷ <https://www.de-ipcc.de/270.php>

5.2.3 Umweltwirkungen Leder und Kunstleder

In einer Ökobilanz werden der Sachbilanz die verschiedenen Wirkungen auf die Umwelt zugeordnet. Für das Projekt wurden aus der Vielzahl gebräuchlicher Umweltaspekte ein Set weitestgehend voneinander unabhängig wirkender Hauptfaktoren (s. Prinzip von PARETO) festgelegt. Die Reihenfolge der für die Bilanz ausgewählten Umweltaspekte in Tabelle 10 folgt keiner Wichtung.

Tabelle 10: Input-/ Output-Bilanz mit den gewählten Umweltaspekten

Umweltaspekt	Bewertungskriterien
Atmosphäre	VOC-, SO ₂ -, CO ₂ -Emissionen
Boden	Verbrauch an land- oder forstwirtschaftlicher Nutzfläche, Verbrauch durch Bergbau
Energie	Verbrauch (primäre und sekundäre Energieträger)
Rohstoffe	Verbrauch (petrochemisch, mineralisch, nachwachsend)
Wasser	Oberflächen- und Grundwasserverbrauch, Eutrophierung der Gewässer (CSB-Fracht)

Ziele und Systemgrenzen einer Ökobilanz bestimmen die Methoden ihrer Erstellung. Sie beruhen in jedem Falle auf Konvention. Stets gilt, dass Vergleiche nur innerhalb einer Ökobilanz zulässig sind und auch die Daten jeweils produktspezifisch d. h., nicht verallgemeinerungsfähig sind. Tabelle 11 weist die Ergebnisse für 5 wirkungsmächtige Umweltaspekte aus. Sie ergänzen die ressourcenmächtigen Aspekte, wie sie in Kapitel 5.2.1 (Tabelle 7) aufgeführt wurden.

Tabelle 11: P80-Werte ausgewählter Umweltwirkungen (Cradle-to-Gate)

Umweltwirkung	VOWAled Pisa	VOWAled Palm Beach	HELLER-Leder Blattwerk	HELLER-Leder Onstage! CF	HELLER-Leder Classic	Einheit
Produktionsabfall, Verpackungen	44	172	344	17	94	kg·100 m ⁻²
überwachungs- pflichtige Abfälle	3	6	259	258	345	kg·100 m ⁻²
CSB-Frachten (Eutrophierung)	1	40	12	5	3	kg O ₂ ·100 m ⁻²
VOC-Emissionen	0,5	0,5	0,03	0,2	0,1	kg C _{org.} ·100 m ⁻²
SO ₂ -Emissionen (Versauerung)	1	0,5	0,5	4	3,5	kg SO ₂ ·100 m ⁻²

Auch für Tabelle 11 wurden die in Kap. 3 und Kap. 5.1.3 beschriebenen Regeln zum Cut-off angewandt⁸. Die für das Blattwerk-Leder auffällige Menge an Produktionsabfällen stellen vornehmlich reine Bioabfälle dar, welche in erster Linie auf Grund des hohen Einsatzes an vegetabilen Gerbstoffen in Summe und der geringen Gerbstoffausbeute bei der Gewinnung des Gerbstoffextraktes aus Olivenblättern im Speziellen zustande kommt. Niedrige Gehalte an Wirksubstanz (RG) bedingen bei gleicher Rezeptur einen höheren Hilfsmitelesinsatz und somit ein spezifisch höheres Abfallaufkommen.

⁸ s. auch Anmerkungen zu Tabelle 7

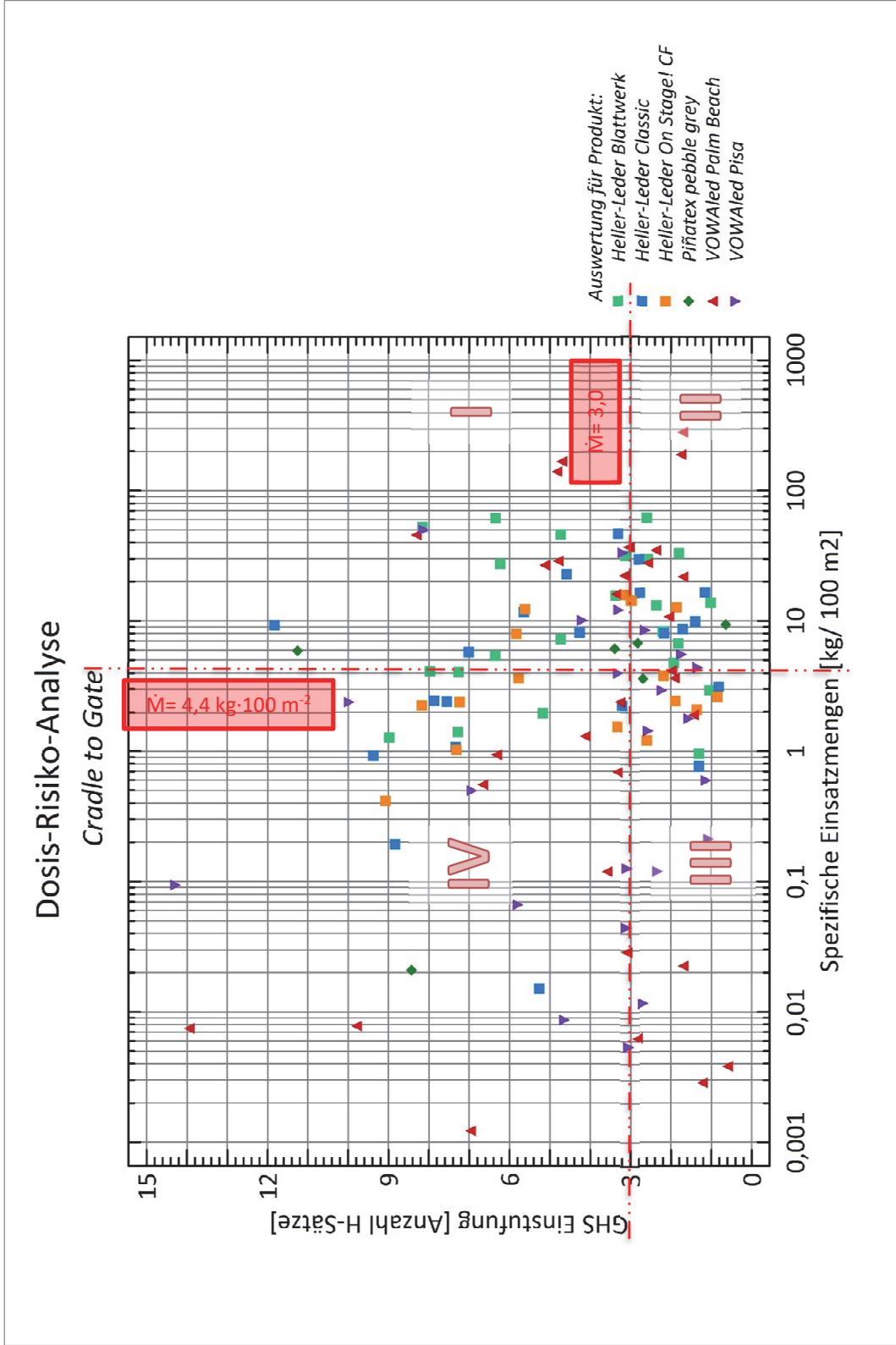


Abbildung 4: Dosis-Risiko-Analyse aufgeschlüsselt nach den untersuchten Produkten

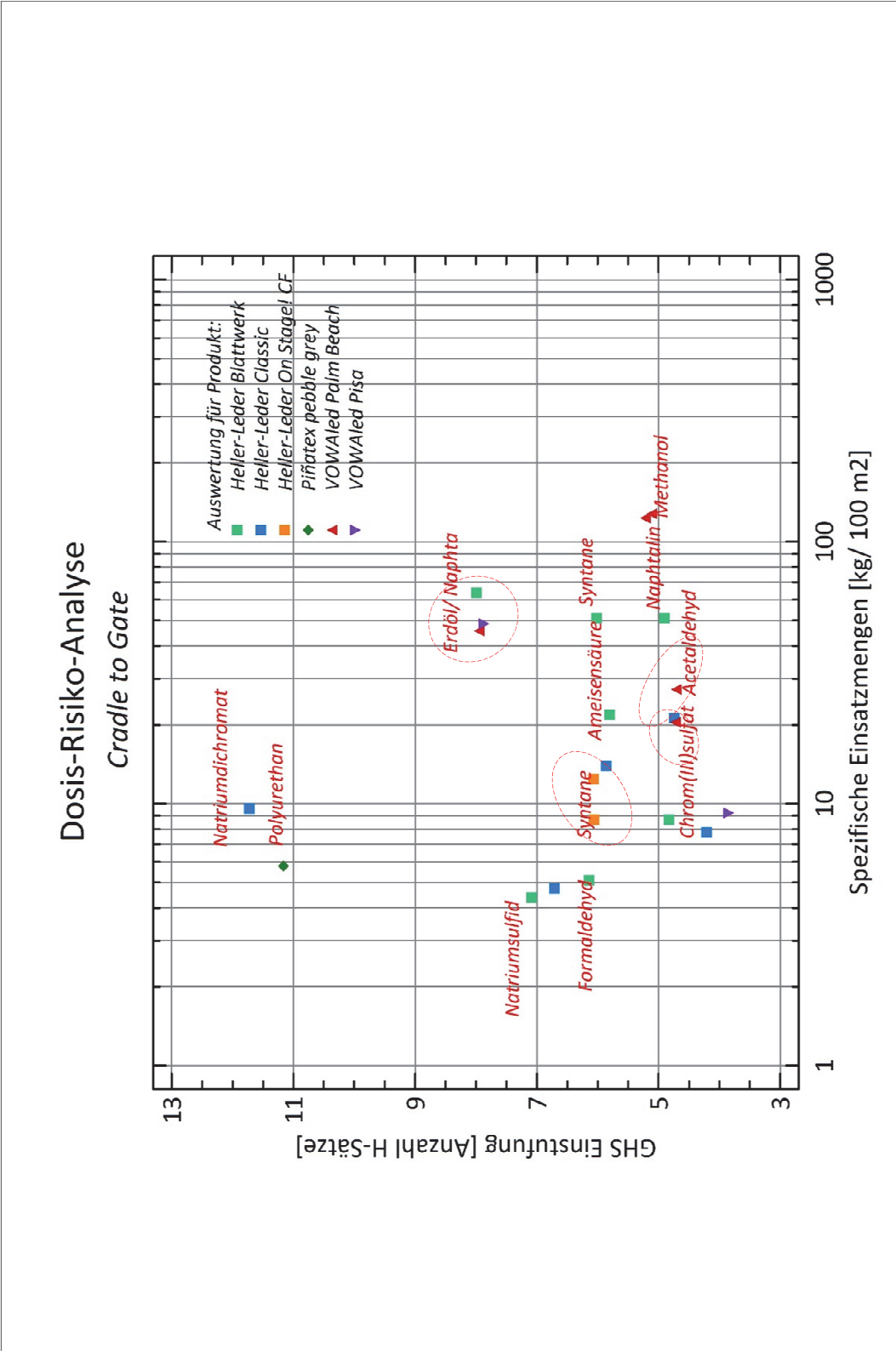


Abbildung 5: Darstellung der Dosis-Risiko-Analyse für Substanzen aus dem ersten Quadranten

Auf Grund der Cut-off-Regel (Pareto) blieben einige Rohstoffe und Hilfsmittel der Kernprozesse unberücksichtigt. Um auch sie mit geringem Aufwand in die Sachbilanz einzubeziehen, wurden sie zusammen mit den übrigen Daten einer speziellen graphischen **Dosis-Risiko-Analyse** unterzogen. Dazu wurde für jedes Produkt die flächenspezifischen Mengen in $\text{kg} \cdot 100 \text{ m}^{-2}$ und aus den Sicherheitsdatenblätter der Hilfsmittel die Anzahl der nach der GHS-Verordnung (Globally Harmonized System of Classification, Labelling and Packaging of Chemicals) gültigen H-Sätze ermittelt, aufsummiert und graphisch aufbereitet. Die GHS-VO wurde vom EU-Ministerrat im Jahre 2008 verabschiedet. Sie ergänzt die REACH-Verordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe. Die H-Sätze (Hazard Statements) beschreiben dabei die Gefährdungen, die von den chemischen Stoffen oder Zubereitungen ausgehen. In der beschriebenen Analyse blieben Substanzen ohne H-Sätze unberücksichtigt. Beispielhaft zeigt Abbildung 4 die Vorgehensweise für die drei Leder und zwei Kunstleder und einem Trendsustitut (Piñatex.)

Aus der Gesamtheit aller Daten wurden die Mediane der beiden Parameter als $\dot{M}_{\text{spez.}}$ und $\dot{M}_{\text{GHS-H}}$ berechnet. Sie dienten nachfolgend zur Aufteilung der Datenwolke in vier Quadranten. Die Aufteilung in Quadranten ermöglicht die schnelle Wichtung und Wertung einer großen Anzahl von Rohstoffen und Hilfsmittel. Im ersten Quadranten finden sich Substanzen, welche sowohl große spezifische Einsatzmengen als auch die meisten H-Sätze aufweisen. Quadrant II beinhaltet Substanzen mit größeren Mengen aber geringer Risikoeinstufung. Entgegengesetzt zeigen sich die Verhältnisse in Quadrant IV. Die Substanzen in Quadrant III sind für die Bewertung eher vernachlässigbar, da beide Parameter niedrige Werte aufweisen.

Da die Darstellung aller Datenpunkt unübersichtlich ist, sollten für die Auswertung nur die Daten der jeweils interessierenden Produktsysteme eingeblendet oder nur der Quadrant I dargestellt werden. So zeigt das Diagramm in Abbildung 5 z. B., dass in der Lederindustrie sechswertige Chromverbindungen keinerlei Anwendung erfährt, jedoch Natriumdichromat sich als eine Komponente in den Vorketten des Hilfsmittels wiederfindet. Auch sind synthetische Gerbstoffe und ihre Vorstufen aufgrund der eingesetzten Mengen und ihrer Rolle als schwer abbaubare Wasserschadstoffe von Relevanz /12/.

Erdöl und Erdgas bilden den Ausgangspunkt zahlreicher Synthesepfade verschiedener Hilfsmittel. Kohlenwasserstoffe in Form von Mineralölen (MKW) gelten bereits in geringer Konzentration im Grundwasser, in Oberflächengewässern, in Böden und Klärschlämmen als bedenkliche Schadstoffe mit hoher Persistenz. Insgesamt werden Öl und Gas überwiegend als Energieträger für Arbeitskraftmaschinen und zur Erzeugung von Prozesswärme und Elektrizität eingesetzt. Die chemische Industrie in Deutschland nutzt Erdöl zu 14 % zu stofflichen Zwecken⁹.

⁹ Bioraffinerien decken heute etwa 10 % des Rohstoffbedarfs der deutschen Industrie (basierend auf 2 Mio. t Biomasse), s. <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/forschung/die-chemische-industrie-kann-auf-erdoel-verzichten/> Stand 17.01.2022

Bei dem Trends substitut Piñatex handelt es sich nach Angaben des Herstellers um ein Nadelvlies, hergestellt aus aufbereiteten Fasern der Ananaspflanze unter Hinzufügung von 12 ...18 % Polylactid PLA¹⁰ (s. Kapitel 5.5.3, Seite 42). Beide Komponenten basieren auf nachwachsenden Rohstoffen. Das Produkt enthält außerdem 10 % Polyurethan. Die Risikobewertung des PU hängt vom Produkttyp und der Art seiner Applikation ab (1K-, 2K-Systeme, wässrige Dispersionen, High Solids, lösemittelbasierte Systeme, Vernetzertyp etc.). Dazu lagen jedoch keine Informationen vor.

Die spezifischen Einsatzmengen von PU zur Ausbildung von Deckschichten (Finish) auf Leder und Kunstleder sind vergleichsweise gering. Die benötigte Menge hängt stark von der Art der gewählten Zurichtung ab und ist bzgl. des spezifischen Flächenverbrauchs bei «100 g TS·m⁻² angesiedelt. Zum Stand der Technik bei der Zurichtung von Leder zählt der Auftrag als wässriges System.

Die dargestellte Methode ist mit geringem Aufwand in der Lage, unter Einbeziehung aller Rohstoffe und Hilfsmittel innerhalb der Systemgrenze 1 und der untersuchten Vorketten auch verdeckte Aspekte und Wirkungen in sehr kompakter und aussagekräftiger Form abzubilden.

¹⁰ PLA = Polylactid (Polymilchsäure) ist ein auf der Fermentation von Kohlenhydraten (Maisstärke, Zuckerrohr) basierendes Biopolymer

5.2.4 Carbon Footprint Leder und Kunstleder

In Kapitel 5.2.2 wurden der Energiebedarf der einzelnen Produktsysteme für die Kernbereiche und deren Vorketten recherchiert und berechnet. Eng gekoppelt an die Energiefrage ist die Darstellung des produktbezogenen CO₂-Fußabdrucks (PCF). Er umfasst alle Emissionen der als klimarelevant eingestuftes Treibhausgase über den gesamten Lebensweg oder eines Teilabschnitts. Tabelle 12 fasst die Ergebnisse als Kohlendioxidäquivalente (CO₂ Äq) zusammen.

Grundlage der Berechnungen bilden die vom zwischenstaatlichen Forum für Klimawandel IPCC vertretenen Modelle zum Global Warming Potential (s. Kapitel 5.2.2). Fossile Biomassen wie Erdöl, Kohle oder Torf gelten als Energieträger mit hohen Emissionskoeffizienten. Die Nutzung rezenter Biomassen wie Holz, Stroh, Biogas, Biodiesel oder Bioethanol wird im Sinne des vom IPCC postulierten anthropogenen Treibhausgaseffekts als emissionsfrei definiert und ein stationäres Gleichgewicht zwischen CO₂-Freisetzung durch Verbrennung und CO₂-Bindung durch Biomassezuwachs vorausgesetzt. Die Energieerzeugung durch Kernenergie, Photovoltaik, Wind- oder Wasserkraft gilt ebenfalls als klimaneutral (s. auch EU-Taxonomie).

Tabelle 12: P80-Werte des Carbon Footprint Kernprozesse und Cradle-to-Gate

Wirkung		VOWAled Pisa	VOWAled Palm Beach	HELLER-Leder Blattwerk	HELLER-Leder Onstage! CF	HELLER-Leder Classic	Einheit
CO ₂ -Emissionen (Kernprozess)	=	45	88	236	291	291	kg CO ₂ Äq·100 m ⁻²
CO ₂ -Emissionen (Cradle to Gate)	≥	195	611	2.584	2.513	2.436	

Eine heftige Diskussion wird darüber geführt, welche Umweltwirkungen, die mit der Viehhaltung verbunden sind, der Milchwirtschaft und der Schlachtindustrie angerechnet werden und welche Anteile auf die Lederindustrie entfallen. In dieser Frage der Allokationen divergieren die Standpunkte stark. Literaturangaben zum CFP für Leder schwanken je nach den gesetzten Randbedingungen erheblich und können nach KNÖDLER¹¹ Werte zwischen 230 ... 3.200 kg CO₂ Äq·100 m⁻² Leder annehmen. Für Gerbereistandorte wurde durch den Verband der Deutschen Lederindustrie e. V. ein System zur Berechnung des Carbon Footprints als sogenanntes ECO₂L-Label entwickelt¹². Nach Untersuchungen von KNÖDLER liegt der CCF einer Vollgerberei für den reinen Herstellungsprozess einschließlich der Vorketten für die Herstellung von 100 m² Leder aus Großviehhäuten bei etwa 1.700 kg CO₂Äq¹³. Dieser Wert korrespondiert in seiner Größenordnung annähernd mit den Angaben in Tabelle 12. Abweichungen ergeben sich aus Unterschieden in den definierten Systemgrenzen und Allokationen.

¹¹ https://leatherpanel.org/sites/default/files/publications-attachments/leather_carbon_footprint_p.pdf Seite 23, Stand: 30.08.2022

¹² <http://www.eco2l-leather.com/> Stand: 05.10.2022, Das Label wurde durch die Forschungsgemeinschaft Leder e.V. und den Verband der Deutschen Lederindustrie e. V. als aktiven Beitrag zum Klimaschutz und zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Ledererzeugnisse initiiert und findet internationale Verbreitung.

¹³ https://leatherpanel.org/sites/default/files/publications-attachments/leather_carbon_footprint_p.pdf Seite 25, Stand: 30.08.2022

5.3 Ergebnisse für Trends Substitute

5.3.1 Sachbilanz Trends Substitute

Für zwei Trends Substitute wurden aus den verfügbaren Angaben Modelle zum Produktionsprozess und den zugehörigen Vorketten entwickelt darauf aufbauend die Sachbilanzen erstellt. Da von den Herstellern keine Daten vorlagen, wurde die Patentliteratur ausgewertet und Internetrecherchen herangezogen (Anlage 10 und 11). Entsprechend ist gegenüber den Sachbilanzen der betrachteten Leder und Kunstleder von einer größeren Datenunsicherheit auszugehen. Das Trends Substitute Piñatex stellt ein veredeltes Nadelvlies dar, dessen Hauptkomponente Zellulosefasern bilden, die aus den Blättern von Ananaspflanzen gewonnen werden (s. Kapitel 5.5.3 Seite 42).

Tabelle 13: P80-Akkumulation Kernprozess Trends Substitute Piñatex

Kernprozesse Trends Substitute			
Ananasfaser	71 %	41	kg·100 m ⁻²
PLA-Bindefaser	19 %	11	kg·100 m ⁻²
	Σ	90 %	

Für die Sachbilanz eines Ledersubstituts aus Pilzmyzel wurde ebenfalls auf Patentschriften zurückgegriffen (s. Kapitel 5.5.3, Seite 43 ff). Das Modell wurden an das Produktsystem vom Typ Mylo angelehnt. Die Herstellung benötigt vor allem große Mengen an kohlenhydrathaltigen Substraten und einem Primäralkohol zur Reinigung und Modifizierung der rohen Myzelmatten¹⁴ (Tabelle 14).

Tabelle 14: P80-Akkumulation Kernprozess Trends Substitute aus Pilzmyzel

Kernprozesse Trends Substitute			
Getreidekorn (Winterweizen)	46 %	939	kg·100 m ⁻²
Methanol	31 %	620	kg·100 m ⁻²
Strohhäcksel	15 %	313	kg·100 m ⁻²
	Σ	92 %	

Tabelle 15 listet die spezifischen Verbräuche (Cradle-to-Gate) an Rohstoffen, Wasser und Flächen für die beiden Trends Substitute auf. Die Erstellung der Sachbilanzen findet sich in den Anlagen 10 und 11.

Tabelle 15: P80-Werte für den Ressourcenverbrauch für zwei Trends Substitute

Ressource		Pilzmyzel	Piñatex	Einheit
petrochemische Rohstoffe	≥	489	⁻¹⁵	kg·100 m ⁻²
mineralische Rohstoffe	≥	27	18	kg·100 m ⁻²
nachwachsende Rohstoffe	≥	1.253	194	kg·100 m ⁻²
Fläche (Agar, Forst, Bergbau)	≥	564	33	m ² ·100 m ⁻²
Biozideinsatz	≥	«0,001	0,02	kg·100 m ⁻²
Wasserverbrauch	≥	76	24	m ³ ·100 m ⁻²

¹⁴ US2018/0282529A1 "Solution based post-processing methods for mycological biopolymer material and mycological product made thereby"

¹⁵ s. auch Anmerkungen zu den Tabelle 7 und Tabelle 11

5.3.2 Energiebilanz Trends Substitute

Tabelle 16: Spezifischer Energieverbrauch (Kernprozesse, Trends Substitute)

	Pilzmyzel	Piñatex	Einheit
≥	32.577	854	MJ·100 m ⁻²
≥	90	2	kWh·m ⁻²

Tabelle 17: P80-Werte für den spezifischen Energieverbrauch (Cradle-to-Gate, Trends Substitute)

	Pilzmyzel	Piñatex	Einheit
≥	43.923	1.744	MJ·100 m ⁻²
≥	122	5	kWh·m ⁻²

5.3.3 Carbon Footprint Trends Substitute

Tabelle 18: P80-Werte des Carbon Footprint Kernprozesse und Cradle-to-Gate

Wirkung		Pilzmyzel	Piñatex	Einheit
CO ₂ -Emissionen (Kernprozess)	≥	200	63	kg CO ₂ Äq·100 m ⁻²
CO ₂ -Emissionen (Cradle to Gate)	≥	952	214	

Alle Ergebnisse der CFP-Analyse wurden als Kohlendioxidäquivalente normiert. Grundlage der spezifischen Emissionsfaktoren für Erdgas, Elektroenergie (Strommix Deutschland) u. a. Energieträger bildeten die aktuellen Angaben des Umweltbundesamtes (UBA) und des Statistischen Bundesamtes (destatis.de). Für die Nutzung von Energie außerhalb Deutschlands, soweit sie in den Vorketten zuzuordnen war, wurden Angaben mit geographischem Bezug herangezogen. Die Berechnungen zur Energieeffizienz und zum CFP sind ebenfalls in den Anlagen 10 und 11 niedergelegt.

5.4 Qualitätsvergleich der Produkte

Produkte müssen ihren Gebrauchszweck erfüllen, um funktionsäquivalente Vergleiche zu führen. Eine unkritische Herangehensweise hinsichtlich der Gebrauchseigenschaften führt zu Verzerrungen und senkt das Vertrauen in Ökobilanzen. Im Lebenszyklus eines Möbelbezugsmaterials stehen die Gebrauchsdauer und -eigenschaften in direktem Zusammenhang zur funktionalen Einheit. Flächenwerkstoffe vereinen in sich Rohstoffe, Halbzeuge und Recyclate unterschiedlicher Herkunft und Qualität. Ihre Nachhaltigkeit wird nicht unwesentlich durch die Wahl der Rohstoffe bestimmt. Das Spannungsfeld von Wettbewerb, Wirtschaftlichkeit, Funktionalität und Nachhaltigkeit zwingt dabei zu Kompromissen /11/. Ökologische Ziele verkehren sich in ihr Gegenteil, wenn minderwertige Rohstoffe, wie z. B. Recyclate, die Lebensdauer eines Produkts drastisch verkürzen, die Gebrauchseigenschaften untergraben oder/und von einem hohen spezifischen Energieverbrauch begleitet werden. Deshalb muss

die Qualität (Gebrauchs- und Pflegeeigenschaften, Haltbarkeit) zwingend in eine ökologische Bewertung einfließen. Für das Projekt wurde für den Verwendungszweck als Möbelbezugsmaterial ein geeigneter Prüfkanon erarbeitet, der sich in 4 Komplexe unterteilt (Tabelle 19).

Tabelle 19: Prüfkanon für die vergleichende Ökobilanz von Möbelbezugsmaterialien

Art der Prüfung	Standard, Methode
<i>Prüfkomplex Funktionalität</i>	
Weiterreißfestigkeit	DIN EN ISO 3377-1
Wassertropfenechtheit	IN EN ISO 15700
Wassertropfenechtheit (Hydrophobie)	DIN EN ISO 15700
Wasserdampfaufnahme WDA	DIN EN ISO 17229
Wasserdampfdurchlässigkeit WDD	DIN EN ISO 14268
Entzündbarkeit von Polstermöbeln	DIN EN 1021-1/ -2
<i>Prüfkomplex Verschleißverhalten</i>	
Abriebwiderstand/Scheuerbeständigkeit (51.200 Touren)	DIN EN ISO 5470-2
Reibecktheit	DIN EN ISO 11640
Farbechtheit gegen Licht (Blaumaßstab)	DIN EN ISO 20105-B02
<i>Prüfkomplex Alterung (Klimakammer)</i>	
Dauerbiegeverhalten vor und nach Klimawechseltest	DIN EN ISO 5402-1
Flächenschrumpf nach Klimawechseltest	DIN EN ISO 17130
Änderung der Biegespannung nach Klimawechseltest	nach /22/ (Anlage 12)
Farbänderungen nach Klimawechseltest	DIN EN ISO 20105-A05
<i>Prüfkomplex Emissionen und Hygiene</i>	
VOC-Emissionen	VDA 278
Formaldehydemissionen	DIN EN ISO 17226-1
Geruchsprüfung	RAL GZ 430
Schimmelpilzfestigkeit	ASTM D 4576-08
Fog-Wert	VDA 278

Der Prüfkanon wurden an 7 Werkstoffmustern entsprechend den aufgeführten Standards durch das akkreditierte Prüflabor der FILK Freiberg Institute gGmbH (DIN EN ISO/IEC 17025) zur Anwendung gebracht (Anlage 12). Für den Prüfkomplex Alterung wurden Prüflinge der Werkstoffe einem speziellen Klimawechseltest in einer Klimakammer ausgesetzt. Der Test lehnt sich an Verfahren aus der Automobilindustrie (Klimawechseltest für Ausstattungsteile PR 303.4, Prüfung der Klimawechselbeständigkeit PV 1200 u. a.) an, wobei jedoch mit Rücksicht auf das Einsatzgebiet deutlich mildere Testbedingungen gewählt wurden. Das Programm umfasste 2 x 5 Klimazyklen zu je 20 Stunden, welche zwischen 60 °C bei 15 %rF und 15 °C bei 90 %rF pendelten. Die Prüfung vor und nach der Alterungssimulation erfolgte grundsätzlich an normklimatisierten Prüflingen. Der Foggingtest entstammt ebenfalls dem Fahrzeugbau. Er liefert Hinweise zu Emissionen in Innenräumen, welche u. U. als belästigend bis störend empfunden werden oder ein Indiz auf vorhandene Schadstoffe im Werkstoff darstellen können.

Auf Basis der Mess- und Analysewerte wurden für jede Prüfung Rangzahlen in einer Abstufung von 1 bis 7 vergeben, wobei Rang 1 das Produkt mit dem besten Ergebnis darstellte (Tabelle 20). Die mehrfache Vergabe der gleichen Rangzahl war möglich. Auf die Wichtung von Parametern wurde verzichtet.

Tabelle 20: Ergebnis der Werkstoffprüfungen nach Rangzahlen

Parameter	Einheit	Rangzahl						
		Leder Blattwerk	Leder Classic	Leder Onstage!	VOWAled Pisa	VOWAled P. Beach	Nivu Releaf	Pinatex pebble grey
Komplex Funktion								
Weiterreißfestigkeit	[N/mm]	2	1	4	6	5	7	3
Wassertropfenechtheit	[Note]	2	2	1	1	1	3	2
Wassertropfenechtheit (Hydrophobie)	[min]	4	5	2	1	1	6	3
Wasserdampfaufnahme WDA	[mg·(cm ² ·8h) ⁻¹]	2	3	5	7	6	1	4
Wasserdampfdurchlässigkeit WDD	[mg·(cm ² ·h) ⁻¹]	1	3	4	5	5	4	2
Entzündbarkeit von Polstermöbeln	[Entzündbarkeit]	1	1	1	2	1	1	3
Komplex Verschleiß								
Abriebwiderstand (Martindale)	[Note]	3	2	2	1	1	4	3
Reibechtheit	[500/250/80 Zyklen]	3	2	3	1	1	4	3
Farbechtheit gegen Licht	[Note]	3	1	1	1	1	4	2
Klimawechseltest in Klimakammer								
Flexometertest nach Klimawechseltest	[50.000 Flex]	1	2	1	4	3	6	5
Flächenschrumpf nach Klimatest	[%A ₀]	1	5	4	2	3	6	2
Flexibilitätsänderung nach Klimatest	[%σ _{B0}]	7	3	4	2	1	6	5
Farbänderung nach Klimatest	[Note]	1	2	2	2	2	3	3
Komplex Emission								
VOC-Emissionen	[ppm]	2	3	1	4	1	6	5
Formaldehydemissionen	[ppm]	2	2	2	2	1	3	4
Geruchsprüfung	[Note]	3	3	3	1	1	4	2
Schimmelpilzfestigkeit	[KBE]	4	4	4	1	2	3	3
Fog-Wert	[ppm]	4	5	3	6	2	1	3

Für die Untersuchungen lagen keine qualifizierten Stichproben im Sinne eines betrieblichen Qualitätsmanagements vor. Deshalb trifft die Auswertung der kumulierten Rangzahlen in dieser Form keine Aussagen über die Erfüllung oder Nichterfüllung von Qualitätsparametern für den Einsatzzweck als Möbelbezugsmaterial, sondern bietet lediglich einen relativen Vergleich. So wurde bspw. die Änderung der Flexibilität im Ergebnis des Klimawechseltests nur nach dem Betrag der relativen Änderung gegenüber der Weichheit im Ausgangszustand bewertet. Dies bedeutete im Einzelfall eine graduell erhöhte oder auch eine herabgesetzte Biegesteifigkeit ohne eine Minderung der Gebrauchseigenschaften. Im Falle der Schimmelpilzfestigkeit versagten alle getesteten Materialien im Sinne der Prüfnorm, jedoch waren Unterschiede in der Schnelligkeit des Aufwuchses und in der Zusammensetzung der beobachteten Stämme zu verzeichnen.

Das Trendprodukt **Nuvi Releaf** baut konsequent auf einer veganen Rohstoffbasis auf. Das Produktdesign stützt sich auf ein wasserstrahlverfestigtes imprägniertes Hanffaservlies (s. Kapitel 5.5.3, Seite 40).

Im Vergleich mit den anderen Produkten erzielte das Material eine geringe Zahl an vorderen Rängen. Anzumerken ist hier, dass die Muster einer Versuchsserie für Täschnermaterial entstammten. Der Vergleich mit Möbelbezugsmaterialien ist deshalb nur eingeschränkt möglich, z. B. in Bezug auf das Alterungsverhalten. Abbildung 6 zeigt zwei stark wellige Prüflinge



Abbildung 6: Nuvi Releaf nach Alterungssimulation in Klimakammer

unmittelbar nach der Alterungssimulation in der Klimakammer. Auf der zugerichteten Seite trat Weichmacher aus. Beim Test auf Entzündbarkeit als Polsterleder schnitten die Muster gut ab. Möglicherweise beruht dieses Ergebnis auf dem natürlichen Silikatanteil der Hanffaser.

Das Produkt **Blattwerk** stellt ein Semianilinleder dar, eine Lederart, welche zu den hochwertigsten Materialien für Polsterleder überhaupt zählt. Nur fehlerarme Rindshäute mit intaktem Narben kommen für die Verarbeitung in Frage. Dieser Rohstoff entzieht sich durch seine begrenzte Verfügbarkeit einer Massenproduktion. Nur Häute aus einer auf das Tierwohl bedachten bäuerlichen Viehhaltung, wie sie bevorzugt im gesamten Alpenraum anzutreffen ist (Süddeutsche Rohware), erfüllen die Ansprüche für die Fertigung von Anilin- und Semianilinleder.

Das Trendsusstitut **Piñatex** stellt im Wesentlichen ein imprägniertes Nadelvlies mit einer Einfachzu- richtung dar und wird als Austauschprodukt für Polster-, Ober- und Täschnerleder angeboten. Die Oberflächenhaptik von Piñatex unterscheidet sich von konventionellen Produkten /16/. Zu beachten ist außerdem, dass das im Material enthaltene PLA gegenüber Strahlung (UV) anfällig ist. Im Vergleich zu den getesteten Ledern zeigten sich Schwächen bei Tests nach der künstlichen Alterung in der Klimakammer. Auch versagte das Material bei der Prüfung auf Entzündbarkeit als Polstermaterial.

5.5 Auswertung

5.5.1 Bewertung Rindleder

Der Charakter der Ressource Tierhaut ist ambivalent. Sie ist sowohl Abfallprodukt als auch nachwachsender Rohstoff. Im Ländervergleich belegen die USA bei der Fleischerzeugung und im -verzehr einen Spitzenplatz. Mit einem Fleischkonsum von >100 kg Fleisch pro Person und Jahr errangen seine Bürger 2018 einen statistischen Rekord /2/. Alle in den USA anfallenden Schlachthäute werden erfasst und zu 90 % nach China, Mexiko, Korea und Thailand exportiert. Im Gegensatz zur traditionellen europäischen Lederherstellung sind auf dem amerikanischen Doppelkontinent Viehzucht, Schlachtung, Fleisch- und Ledererzeugung in Großunternehmen organisatorisch und technisch unter einem Dach vereint. Weltgrößter Fleischproduzent ist z. Z. das brasilianische Unternehmen JBS S. A. mit Hauptsitz São Paulo¹⁶. Die Unternehmensgruppe steht international in der Kritik, illegal gerodeten Regenwald als Weideland zuzulassen /1/. Im Gegensatz dazu sind die Gerbereiunternehmen in Deutschland in der Lage, alle eingehenden Schlachthäute systematisch zu erfassen und über jede Haut einen sicheren Herkunftsnachweis zu führen. Statistiken der FAO¹⁷ zeigen, dass in vielen Regionen der Welt Häute als Schlachtabfall noch immer verloren gehen und dabei die Umwelt beeinträchtigen. Es kann davon ausgegangen werden, dass mindestens die Hälfte aller Schlachthäute keine stoffliche Verwertung erfahren¹⁸.

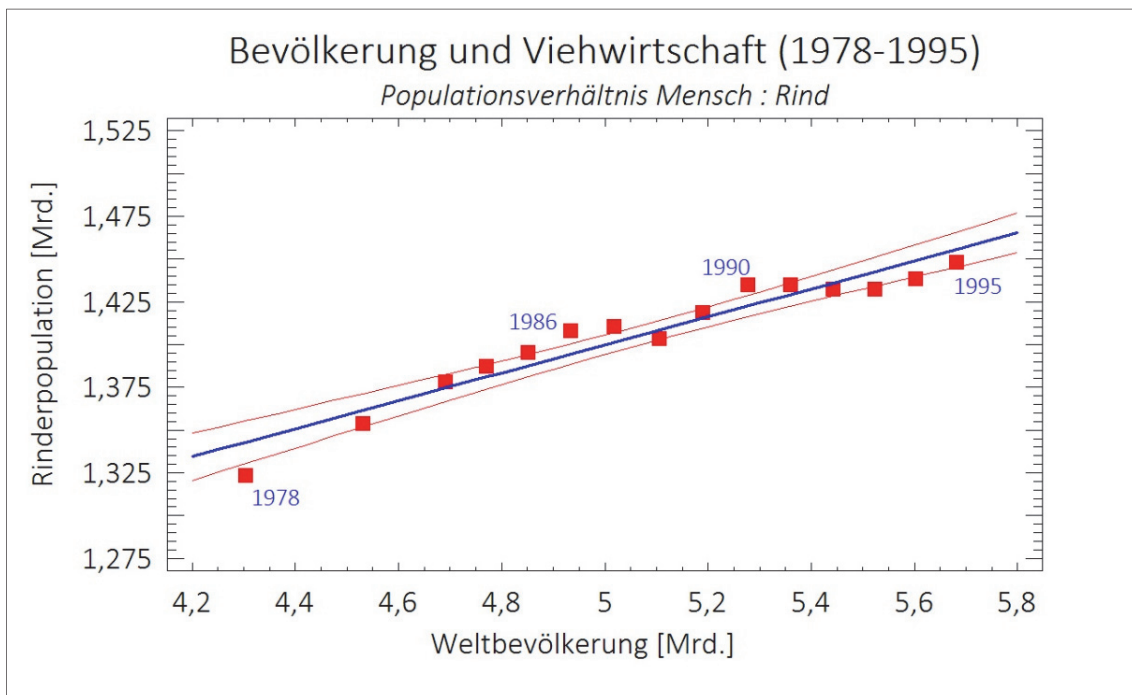


Abbildung 7: Zusammenhang von Bevölkerungsentwicklung und Viehwirtschaft

¹⁶ <https://www.topagrar.com/schwein/news/brasilianischer-fleischriese-jetzt-weltweit-nummer-eins-9557501.html>

¹⁷ [Food and Agriculture Organisation of the United Nation \(www.fao.org/\)](http://www.fao.org/)

¹⁸ <https://vdl-web.de/2021/02/03/kohlenstoffzahlen-zeigen-warum-haeute-nicht-in-den-muell-wandern-duerfen/>

Aus Großviehhäuten entstehen pro Jahr weit über eine Milliarde Quadratmeter Rindleder¹⁹. Etwa die Hälfte wird zu Oberleder verarbeitet /23/. Heftig umstritten sind die Art der Allokationen, welche das Verhältnis von Viehzucht, Schlachtindustrie, Häutehandel und Lederindustrie definieren sollen. Jede Gerberei ist nicht nur Abnehmer eines Nebenprodukts, sondern selbst Ausgangspunkt zahlreicher Kop-
pelprodukte (Kollagen, Gelatine, Keratin, Casings, Hydrolysate, Leim, Lefa). Viele landwirtschaftliche Flächen sind für den Pflanzenbau zum Zwecke der Lebensmittelproduktion ungeeignet und kommen nur als Weideland oder für andere Futter- oder Nutzpflanzen in Frage. Pflanzenbau und Viehhaltung bedingen einander und bilden einen Stoffkreislauf. Die Rohstoffbasis von Leder stellt global betrachtet eine selbstregulierende Größe dar. Sie beruht auf dem Zusammenhang von Weltbevölkerung, Ernährung und Viehbestand (Abbildung 7) /21/.

Die Kritik am Werkstoff Leder übersieht, dass ein Schlachthof ohne Häutehandel und Gerberei innerhalb kürzester Zeit vor einem unlösbaren Abfallproblem stehen würde, einhergehend mit massiven Auswirkungen auf den Seuchenschutz, die Luftreinhaltung, die Schädlingsbekämpfung, die allgemeine Hygiene, den Gewässerschutz und in der Entsorgungs- und Deponiewirtschaft.

Betrachtet man die tierische Rohhaut als zu entsorgendes Gut in der Erzeugerkette der Ernährungsindustrie, ergibt sich für die Umwandlung in Leder eine positive CO₂-Bilanz. Eine 56 kg schwere, schlachtfrische Bullenhaut der unkontrollierten Fäulnis preisgegeben, wird zur Quelle von Treibhausgasen. Für den Modellfall eines vollständigen anaeroben Abbaus der Haut würden im Extremfall $\geq 15,5 \text{ Nm}^3$ Faulgase (CO₂, CH₄, NH₃, H₂S) emittiert (Anlage 16). Durch den Gerbprozess entfallen diese Emissionen und es kann theoretisch eine GWP-Gutschrift von ca. -2.130 kg CO₂ Äq pro 100 m² angerechnet werden. Die massenhafte Verarbeitung von Schlachthäuten zu Tiermehl in Tierkörperverwertungsanstalten stellt nur eine theoretische Entsorgungsalternative dar. Sie wäre mit großen logistischen, ökologischen und ökonomischen Problemen verbunden. In Deutschland wurden im Jahre 2021 3,2 Mio. Rinder nahezu ausschließlich inländischer Herkunft geschlachtet²⁰. Ein mittleres Rohhautgewicht von 40 kg unterstellt, würde dies die zusätzliche Entsorgung von 128.000 t hygienisch bedenklichem, nicht lagerfähigen Abfall und dessen sicheren Transport in 22 der dafür in Deutschland zugelassenen und spezialisierten Unternehmen²¹ bedeuten.

In der vorliegenden Umweltbilanz wurden die landwirtschaftlichen Verhältnisse im Herkunftsgebiet der Rohhäute (Süddeutsche Ware) berücksichtigt. Aufgrund der kurzen Transportwege zwischen bäuerlichem Betrieb, Schlachthof, Häutehändler und Gerberei ist die Einarbeitung als gekühlte Ware möglich. Die Konservierung mit Steinsalz wird so vermieden.

¹⁹ <https://www.leder-info.de/index.php/Lederindustrie>, Stand: 13.09.2022, Weitere Quellen für Leder sind Häute von Pferden (Cordovan), Kame-
len, Ziegen, Schafen, Schweinen, Wildtieren einschließlich Reptilien aus Farmhaltung sowie Amphibien und Fische

²⁰ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/459147/umfrage/rinderschlachtungen-in-deutschland/>, Stand: 13.09.2022

²¹ [https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriearbeiten/nahrungs-futtermittelindustrie-tierhaltungsan-
lagen/schlachtbetriebe-verwertung-tierischer#schlachthofe-und-schlachtbetriebe-in-deutschland](https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriearbeiten/nahrungs-futtermittelindustrie-tierhaltungsan-
lagen/schlachtbetriebe-verwertung-tierischer#schlachthofe-und-schlachtbetriebe-in-deutschland), Stand: 13.09.2022



Abbildung 8: Vollmechanisierte Entfleisch- und Spaltlinie für Großviehhäute im Wasserwerkstattbereich der Gerberei (Quelle: HELLER-Leder GmbH & Co. KG)

Für die Berücksichtigung der Umweltfrachten aus der Viehhaltung, speziell der CO₂-Äquivalente, wurde eine massenbasierte Allokation gewählt. Die für die Produktion von 100 m² Fertiglleder benötigte Masse Rohhaut wurde dem gesamten Biomassertrag einschließlich Fleisch, Milch und Nachzucht (Kälber) der geschlachteten Tiere gegenübergestellt. Die Unterschiede zwischen Kernprozess und Cradle-to-Gate-Bilanz beruhen in Summe wesentlich auf dieser Allokation (Tabelle 12). Analog wurden auch andere Parameter wie z. B. der Wasserfußabdruck bilanziert. Mit Rücksicht auf die klimatischen und hydrologischen Verhältnisse des Alpenraumes wurde kein sogenanntes "virtuelles", "graues" oder "grünes" Wasser (Niederschlag, Verdünnungswässer) in die Bilanzen aufgenommen /15/.

Die Gerbung bildet eine Reihe von Batchprozessen mit dem Stückgut Tierhaut. Sie stellt den bestimmenden Faktor hinsichtlich Ökologie, Qualität und Kosten dar. Ihre Individualität setzt der Rationalisierung der Produktion Grenzen und ist u. a. ein Grund für den spezifisch höheren Energieverbrauch gegenüber Kunstleder. Energie wird für die mechanische Bearbeitung, die Warmwasserbereitung und vor allem für Trocknungs- und Vernetzungsprozesse benötigt. Durch das Entfleischen und Spalten der Blöße²² an der Nahtstelle zwischen Wasserwerkstatt und Gerbung (s. Abbildung 8) fallen Koppelprodukte an, die in den Allokationen zu berücksichtigen sind. Talg, Fleisch- und Bindegewebsreste dienen optional der Energiegewinnung (Biogas, Biofuel); Unter-, Mittel- und Narbenspalte werden zu Narben- und Spaltleder bzw. zu technischer und Speisegelatine, Leim oder Casings²³ verarbeitet. Die nach der Gerbung anfallenden Falzspäne gelangen in die Lefaherstellung²⁴ oder eignen sich für die Gewinnung von Eiweißhydrolysat in der Fettchemie. Die bereits vor Jahrzehnten durchgeführte Umstellung der lösemittelbasierten Lederzurichtung auf wässrige Systeme minimiert die VOC-Emissionen, erhöht aber aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität von Wasser den Energiebedarf. Während sich bei Kunstleder ein großer Anteil der aufgewendeten Energie in den Vorketten (Hilfsmittelsynthesen) wiederfindet, konzentriert sich der Energieeinsatz bei Leder auf den Kernprozess, da die tierische Rohhaut bereits als natürliches flächenhaftes Vorprodukt angeliefert wird. Das Blattwerk-Leder zeigt die höchste Energieeffizienz und die niedrigsten VOC-Emissionen aller drei Leder. Höher fallen hingegen der Verbrauch an nachwachsenden Rohstoffen und die Abfallmengen aus. Die Ursachen dafür sind u. a. in der Vorkette des Gerbstoffs Wet Green® zu suchen, einem Extrakt aus Olivenblättern, einem Nebenprodukt mediterraner Olivenplantagen. Olivenblätter besitzen von Natur aus keine Gerbwirkung. Erst eine enzymatische Aufbereitung und eine Anreicherung über Membranfilter liefert ein hochviskoses Produkt mit ca. 6 % RG²⁵; ein im Vergleich mit echten vegetabilen Gerbmitteln niedriger Gehalt. So enthält bspw. Quebrachoholz über 30 % RG; als Sprühextrakt aufkonzentriert, sind Gehalte von 70 % RG erzielbar.

²² von Keratin befreite alkalisch aufbereitete Haut

²³ Wursthüllen für die Lebensmittelindustrie

²⁴ Lefa (Lederfaserstoffe) dienen der Herstellung von Schuhkappen, Bucheinbänden, Gürteln und als Täschnermaterial

²⁵ Stichprobenanalyse zum Reingerbstoffgehalt am FILK Freiberg Institute gGmbH nach der VGCT-Filterglockenmethode

Der Verwendung von dreiwertigem Chromsulfat in der Hauptgerbung für das Classic-Leder ist durch Energieeffizienz, kurze Prozesszeiten und einen geringen Gerbstoffbedarf charakterisiert. Die Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der Chromgerbung sowie die besonderen Ledereigenschaften sind der Grund, warum diese Technologie seit ca. 100 Jahren die Weltlederproduktion zu ca. 80 % dominiert. Dafür werden jährlich ≤ 2 % der Weltchromproduktion benötigt. Wenig bekannt ist, dass der in Deutschland produzierte Chromgerbstoff ein Nebenprodukt der Montanwachsindustrie ist. Hier wird Natriumdichromat als starkes Oxidationsmittel zur Bleiche der Wachse eingesetzt.

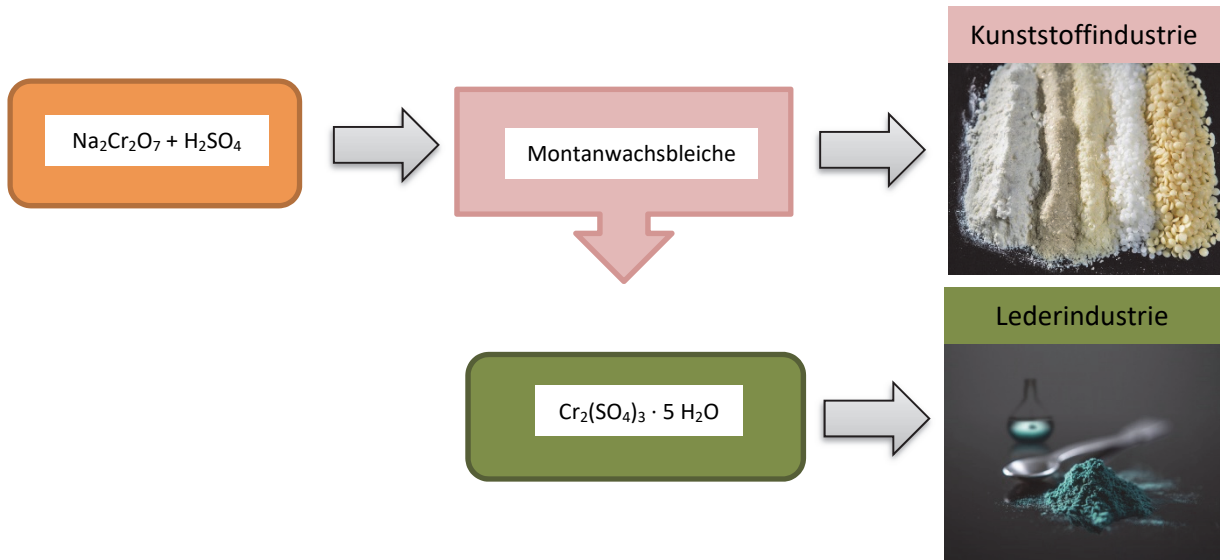
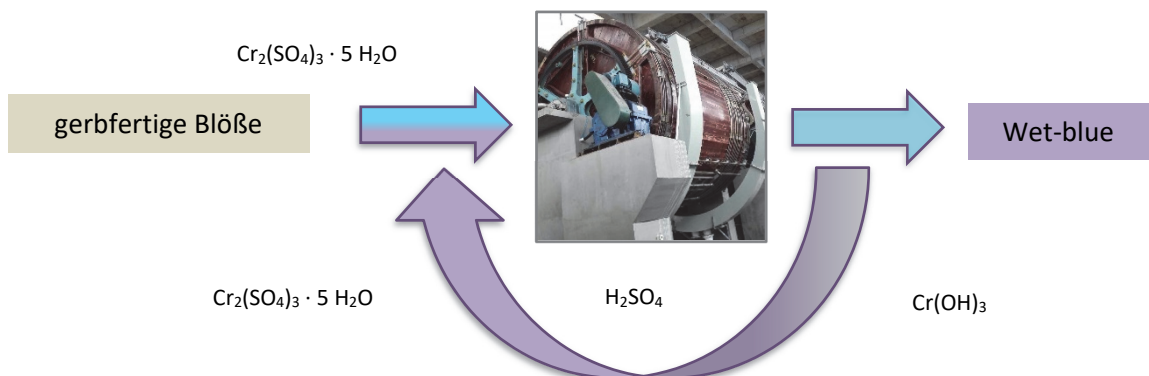


Abbildung 9: Montanwachs und Basochromgerbstoff als Kuppelprodukt
(Bildquelle: Völpker Spezialprodukte GmbH)

Der Prozess hinterlässt schwermetallhaltige Rückstände, welche im Normalfall als überwachungs-pflichtige Abfälle zu entsorgen wären. Eine Wiederverwertung liefert stattdessen basisches Chrom-III-sulfat, welches als hochwertiger Gerbstoff vermarktet wird (s. Abbildung 9, Anlage 13). Diese Allokation wurde u. a. bei der Analyse der Vorketten des Polsterleders Classic berücksichtigt. Die Chromgerbung ist außerdem das einzige Gerbverfahren, bei dem ein echtes Recycling praktiziert werden kann. Dabei ist es möglich, über 95 % der im Abwasser gelösten Chromrestsalze in den Prozess zu rezirkulieren. Der Gerbstoffverbrauch kann dadurch um bis zu einem Drittel gesenkt werden (s. Schema).



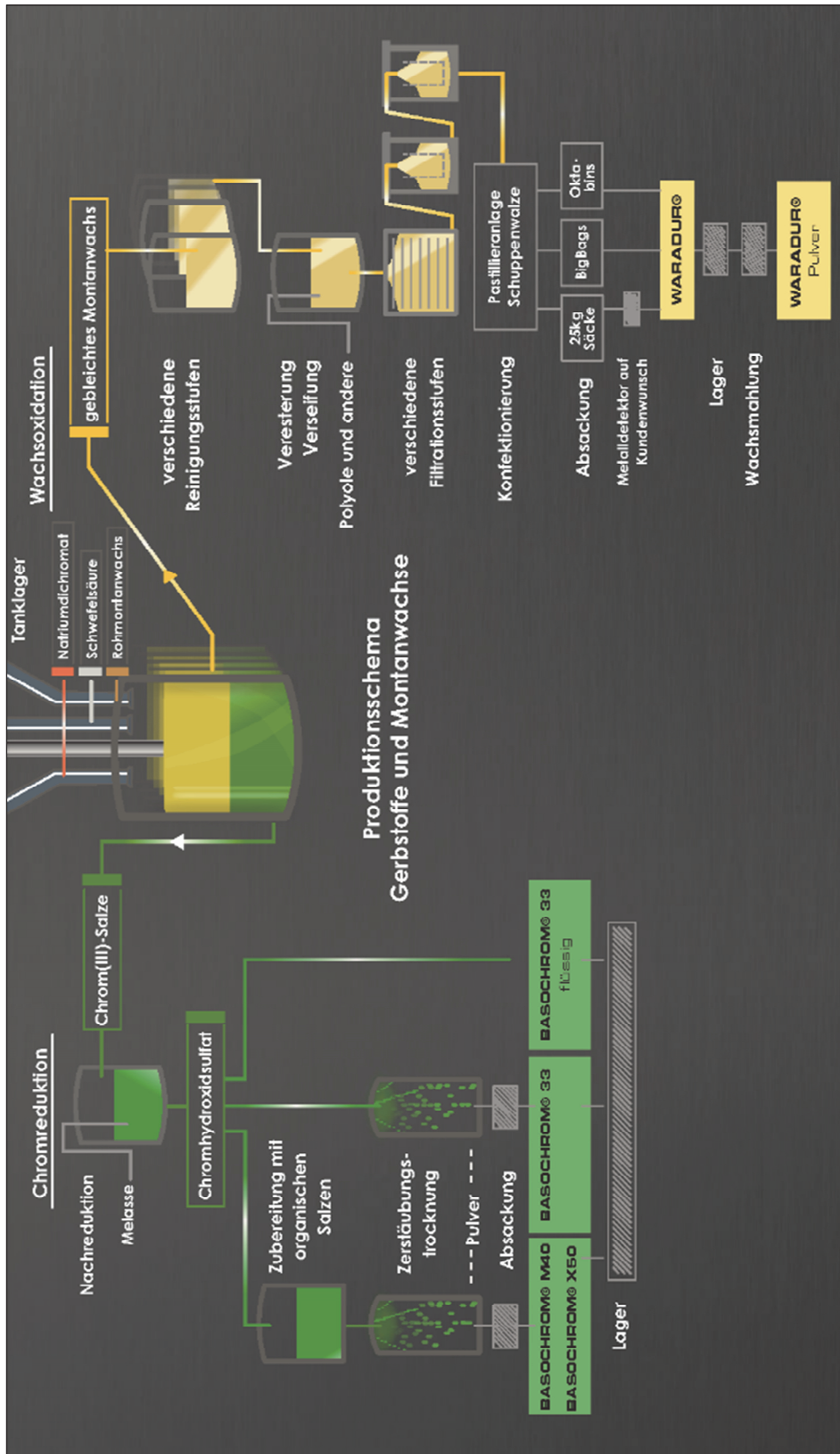


Abbildung 10: Gewinnung von Chrom-(III)-sulfat als Kuppelprodukt der Montanwaxproduktion (Quelle: Völpker Spezialprodukte GmbH)

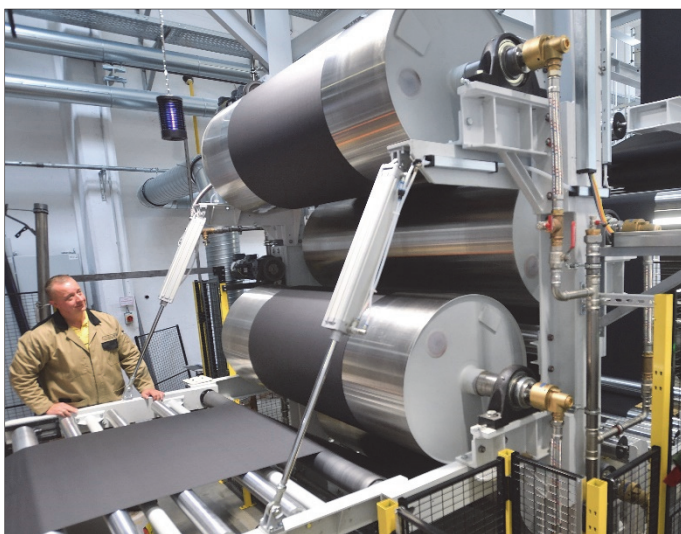
5.5.2 Bewertung PVC-Kunstleder

Die Herstellung von PVC-Kunstleder stützt sich primär auf mineralische und petrochemische Hilfsmittel und Rohstoffe. Die hohe Effizienz der damit verbundenen Prozesse in der Grundstoff-, Kunststoff- und Chemiefaserindustrie spiegelt sich in den Daten der Tabelle 7 wider. Gegenüber dem Batchbetrieb der Lederherstellung sind Streichverfahren für PVC-Kunstleder durch die Arbeit von Rolle-zu-Rolle und den Einsatz von Warenausparnissen in der Lage, eine hochrationelle unterbrechungsfreie 24/7-Produktion zu gewährleisten. Die Verfahren sind energetisch effizient und weisen einen vergleichsweise niedrigen CO₂-Fußabdruck auf. Zur Energieeffizienz tragen u. a. fortschrittliche Verfahren zur Wärmerückgewinnung bei. So erfolgt bspw. in der Vowalon Beschichtung GmbH die Reinigung der Abluft aus den Beschichtungseinheiten mittels regenerativer thermischer Oxidation (RTO). Im Vergleich zu einer konventionellen TNV wird ein sehr hoher thermischer Wirkungsgrad erreicht. Die Abwärme des Reinluftstroms wird auf einen Absorptionskälteabsorber übertragen und zur Bereitstellung von Kühlwasser genutzt. Das Kühlwasser zirkuliert zwischen dem Absorber und den Kühlwalzen der Beschichtungseinheiten (s. Abbildung 11 und Abbildung 12). Eine weitere Kaskade zur Nutzung der Absorptionswärme der Einheit wird z. Z. geprüft.



Abbildung 11: Absorptionskältemaschine
(Quelle: Vowalon Beschichtung GmbH)

Das Prinzip der äußeren PVC-Weichmachung gestattet eine große Vielfalt von Rezepturen für PVC-Beschichtungsmassen. Verfahren der Kunststoffbahnenindustrie bilden regelmäßig auch die Basis für



alternative Trends Substitute. Der Anteil nachwachsender Rohstoffe kann durch entsprechende Hilfsmittel in den Rezepturen gesteigert werden. Die Übergänge sind fließend. So enthält z. B. der textile Träger des Standardprodukts VOWAled Pisa bereits ein Biopolymer in der Form von Viskosefasern.

Abbildung 12: Kühlwalzen mit laufender Warenbahn
(Quelle: Vowalon Beschichtung GmbH)



Abbildung 13: Beschichtungsanlage mit Warenspeicher im Vordergrund (Quelle: Vowalon Beschichtung GmbH)

Die Rezeptur des Produkts VOWAled Palm Beach stützt sich wiederum auf ein Weichmachergemisch, deren Hauptkomponente vegetabilier Herkunft ist. Die industrielle Nutzung nachwachsender Rohstoffe, in diesem Falle zur Erzeugung flexibler Flächenwerkstoffe, verlangt dabei in den Vorketten einen spezifisch höheren Einsatz an Fertigungsenergie gegenüber dem Standardkunstleder.

In die Herstellung von konventionellem PVC-Kunstleder fließen sowohl petrochemische als auch mineralische Ressourcen ein. Obwohl Erdgas und Erdöl wertvolle stoffliche Ressourcen darstellen - 90 % aller in Deutschland produzierten Chemieprodukte benötigen Naphtha - überwiegt ihre energetische Nutzung. Weltweit werden 97 % aller fossilen Energieträger verbrannt²⁶. Für PVC-Kunstleder und dessen Ressourcenlage sind Allokationen zu beachten, die in den vorgelagerten Produktketten als Chloralkalielektrolyse und in der Erdölverarbeitung (Crackprodukte, Ethylen) auftreten. Ihre Umweltwirkungen fächern sich entsprechend der zahlreichen Koppelprodukte auf. Steinsalz als Basis der Chlorchemie bildet in seiner ressourcenmächtigen Wirkung de facto einen regenerativen Rohstoff anorganischen Ursprungs. Der geologische, biologische und human induzierte Salzkreislauf ist eng mit dem natürlichen Wasserkreislauf verbunden. Die Weltmeere bilden eine gigantische Rohstoffsene an Natriumchlorid von geschätzt 50 Billionen Tonnen²⁷. Die universellen Einsatzmöglichkeiten von PVC und die Unerschöpflichkeit seiner Basisressource begründen seine Verbreitung in fast allen Lebensbereichen. Als Schätzung kann die weltweite Produktion von Kunstleder auf Basis Synthesefasern, Weich-PVC und PU im Bereich von $20 \cdot 10^9 \text{ m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ beziffert werden /23/. Eine vollständige Substitution durch nachwachsende Rohstoffe erscheint angesichts dieser Mengen undenkbar.



Abbildung 14: Halbtechnische Versuche zu PVC-Streichverfahren am FILK Freiberg Institute gGmbH (Quelle: B. Trommer, Freiberg)

²⁶ <https://www.statistik.rlp.de/fileadmin/dokumente/monatshefte/2008/Mai/05-2008-352.pdf>, In Deutschland besteht eine höhere stoffliche Verwertungsrate petrochemischer Rohstoffe gegenüber dem globalen Durchschnitt.

²⁷ https://www.io-warnemuende.de/Antworten_Fragen_zum_Meer.html?frage=52 Stand 31.08.2022

Die Kernprozesse der PVC-Kunstlederherstellung erfuhren in den letzten Jahrzehnten technologische Umwälzungen, die zu signifikanten ökologischen Verbesserungen führten. Dazu zählen die Substitution schwermetallhaltiger Stabilisatoren (Cd) und kritischer Weichmacher (Phtalate), die Einführung biobasierter Rohstoffe (Weichmacher), das Schließen von Stoffkreisläufen (Recyclate), die Wärmerückgewinnung (Rekuperatoren) und ein Emissionsschutz nach dem fortgeschrittenen Stand der Technik (TNV, KNV, RTO). Derzeit wird an der vollständigen Ablösung des Einsatzes von Erdgas bei der Herstellung von PVC-Kunstleder und eine Zero-Emissionsstrategie (VOC) geforscht²⁸ (Abbildung 14).

5.5.3 Bewertung Trends Substitute

Die medienwirksam als Alternativen für Leder oder PVC-Kunstleder propagierten Trends Substitute sind derzeit für eine industrielle Nutzung als Möbelbezugsmaterialien nur sehr begrenzt verfügbar. Technologisch lassen sie sich in drei Gruppen unterteilen:

- (1) konventionelle Kunstledertechnologie, Substitution eines Rezepturbausteins
- (2) konventionelle Kunstledertechnologie, Substitution von mehr als einem Rezepturbaustein
- (3) innovative Technologieansätze, Anwendung neuer biopolymerer Rezepturbausteine

Bei dem Versuch einer Systematik fallen zunächst Produkte auf, die in Rezeptur und Technologie dem Stand der Technik folgen und lediglich eine oder zwei Rezepturbestandteile austauschen und auf die besondere Herkunft der Ersatzkomponente verweisen. Typisches Beispiel ist die Substitution synthetischer Trägertextilien durch Baumwollgewebe. Der massenhafte Einsatz von Baumwolltextilien als technischer Werkstoff würde den Rückgriff auf eine vorindustrielle Rohstoffbasis bedeuten. Baumwollmonokulturen fallen durch ihren enormen Fußabdruck bei Wasser, Dünger und Pestiziden auf. Die Anbauflächen treten in direkte Konkurrenz zur Lebensmittelerzeugung. Der Einsatz von Baumwolle ist somit im Sinne von Naturschutz und Nachhaltigkeit ein ökologischer Wegschritt.

Ein bekannter Vertreter der ersten Produktgruppe bildet das sogenannte **Apfelkunstleder (Apple Skin)**. Die Technologie entspricht dem Stand der Technik von Kunstleder²⁹. Die Namensgebung des Materials entspringt der Herkunft des verwendeten zellulosehaltigen Füllstoffs (WO 2019/ 076999A1). Der ökologische Anspruch auf Nachhaltigkeit beruht auf der Nutzung fein gemahlener und getrockneter Apfeltrester, ein Nebenprodukt der Kernobstverarbeitung. Die dabei propagierte Einarbeitung von Zellulose in die Beschichtungsmasse zählt zum Stand der Technik und kann auf eine lange Tradition verweisen.

²⁸ <https://www.filkfreiberg.de/forschung-entwicklung/projekte-und-publikationen/aktuelle-projekte/rezepturen-fuer-eine-hf-basierte-pvc-kunstledertechnologie> Stand:23.08.2022

²⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=DwIVSAsVbqg> Stand: 13.09.2022, Das Video zeigt eine konventionelle Prozesslinie zur Herstellung von Kunstleder im Streichverfahren. Die Feuchte des Apfeltresters als Ausgangsrohstoffs für den Füllstoff wird mit 60 ... 70 % angegeben. Vorgaben für die Restfeuchte von Hilfsmitteln in der Kunststoffverarbeitung bewegen sich bei < 0,05 %.

Patentiertere Lösungen dazu existieren seit ca. 100 Jahren (z. B. D.R.P. 254762³⁰, D.R.P. 319 402³¹, DE 1014960³², DE 83331, DD 97430 u. a.). Ein aktuell am Markt verfügbarer Vertreter dieser Art von Füllstoff bildet z. B. die Marke Arbocel^{®33}. Das Produkt dient u. a. der Oberflächenmodifizierung von PU-Kunstleder. Im Vergleich mit konventioneller Zellulose wird beim Apfelkunstleder ein Abfall eingesetzt, der eine schwankende Mischung aus Zellulose, Lignin, Kohlehydraten, Fruktose, Pektin u. a. m. darstellt. Die Gegenwart von leicht bioverfügbaren Kohlehydraten birgt das Risiko mikrobiellen Bewuchses oder einer Geruchsbildung. Ob die Aufbereitung von Trester aufwandseitig gerechtfertigt ist, könnte nur eine vergleichende Ökobilanz mit konventionellen zellulose- oder ligninhaltigen Füllstoffen klären. Eine Anfrage zum Thema Ökobilanz wurde vom Anbieter nicht beantwortet. Die untergeordnete Bedeutung von Füllstoffen für Beschichtungsmassen lässt den Nutzen einer aufwendigen Ökobilanz gering erscheinen.

Trendsubstitute der zweiten Gruppe - Substitution von mehr als einem Rezepturbaustein - zielen häufig auf eine vegane Kundschaft. Ein typischer Vertreter bildet das Produkt **Nuvi Releaf**. Das Start-up-Unternehmen NUVI Releaf GmbH zeigte sich im Rahmen des Vorhabens zu einer Zusammenarbeit bereit und stellte Muster für eine Prüfung zur Verfügung und beantwortete Fragen zur Technologie. Das Unternehmen kann außerdem auf eine eigene Ökobilanz zum Produkt verweisen.³⁴ Die Herstellung für Nuvi Releaf als Lederimitat (WO2020/079269A1) vermeidet konsequent den Einsatz synthetischer Polymere. Rohstoff für den textilen Träger bilden Hanffasern aus europäischem Anbau. Hanf zeigt gegenüber Baumwollprodukten eine deutlich bessere Nachhaltigkeit³⁵. Vor allem preisgünstige Kurzfasern, deren Qualität einer Veredelung in der Bekleidungsindustrie nicht genügt, können zu einem wasserstrahlverfestigten Vlies verarbeitet und, wie für ökologisch ausgerichtete Non Woven aus Naturfasern üblich /30/, mit Polysacchariden, Zellulose, Stärke oder Stärkeabbauprodukten imprägniert werden (Abbildung 15). Die benötigten Hilfsmittel sind am Markt als technische Produkte bzw. Lebensmittelzusatzstoffe verfügbar. Die Einsatzmengen für das Imprägnieren übersteigen die Grammage des Trägertextils. Der Test zur Schnellalterung führte zu welligen Prüflingen und einer Weichmachermigration (s. Abbildung 6, Seite 31). Während die Einsatzmöglichkeiten des Produkts als veganes Täschnermaterial zweifellos gegeben sind, erscheint der Langzeitgebrauch als Polsterbezugsmaterial noch nicht gesichert. Problematisch dürfte sich das Verschleißverhalten und das spezielle Löse- und Quellverhalten sowie die Anfälligkeit einiger Komponenten gegenüber Hydrolyse und mikrobiologischem Abbau (Enzyme, Pilze, Bakterien) erweisen.

³⁰ "Verfahren zur Herstellung von Appreturen, Füllungen, Schichten, Druck- und Auftragsschichten, Anstrichen, Überzügen jeder Art, Häuten (Films), Fäden, Klebstoffen, Kittten, Bindemitteln, elastischen und plastischen Massen" Patentschrift vom 15. November 1910

³¹ "Herstellung von Kunstleder" Patentschrift vom 04. Oktober 1917

³² "Verfahren zur Herstellung von luft- und gasdurchlässigem Kunstleder" Auslegeschrift vom 05. September 1957

³³ https://www.jrs.de/jrs_de/fiber-solutions/bu-industrie/anwendungen/pu-leder/ Stand: 13.09.2022

³⁴ Untersuchung am Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik des PZH der Leibniz Universität Hannover / PZH, unveröffentlicht

³⁵ <https://www.zdf.de/nachrichten/video/panorama-flachs-mode-100.html>, Stand: 19.10.2022 (Quelle TÜV Rheinland)



Abbildung 15: Querschnitt Nuvi Releaf (Lichtmikroskop)

Der Anbau und die textile Verarbeitung von Hanf reicht bis in die Antike zurück, besetzt heute jedoch nur eine Nische. In Westeuropa wurden 2015 zwischen 120.000 und 140.000 t Hanffasern gewonnen /6/. Der Großteil der Ernte gelangt als Langfaser in die Textilfabrikation; lediglich 18 % Kurzfasern stehen für die Zellstoff- und Papierindustrie, für technische Vliese, Dämmstoffen, WPC³⁶ u. a. m. zur Verfügung.

Unter der theoretischen Annahme, dass von 21.600 ... 25.200 t·a⁻¹ Kurzfasern ca. 5 % für eine Vliesproduktion mit einer Grammage von 80 g·m⁻² preisgünstig verfügbar wären, würden daraus ca. 14 Mio. m² Vlies resultieren. Demgegenüber erfasste das Statistische Bundesamt 2016 allein in Deutschland die Produktion von rund 618 Mio. m² beschichteter Gewebe. Eine mit der PVC-Kunstledertechnologie vergleichbare Produktivität unterstellt, würde die Verarbeitung der genannten Menge Hanfvlies durch ein mittelständisches Unternehmen wie z. B. der Vowalon Beschichtung GmbH etwa einer Jahresproduktion entsprechen. Angesichts der Ressourcenlage erscheint der Einstieg in eine industrielle Fertigung möglich; der quantitativen Substitution konventionellen Kunstleders auf Basis PVC oder PU sind jedoch Grenzen gesetzt.

³⁶ WPC = Wood Plastic Composite, Bezeichnung für Verbundwerkstoffe aus Lignin/ Zellulose/ Holz und Kunststoffen

Das Produkt **Piñatex** (Abbildung 16) kann ebenfalls der zweiten Gruppe von Trendsustitute zugeordnet werden. Hier wird der Rohstoff für das Trägertextil durch ein Nebenprodukt der Agrarindustrie substituiert. Dazu werden die oberirdischen Ernterückstände aus Ananaskulturen genutzt. Die Aufbe-

reitung und Verarbeitung der Blätter zu einem zellulosehaltigen Vlies ähnelt z. T. der Gewinnung von Flachs. Ressourcenseitig kann von einer guten Basis ausgegangen werden, da Zentren ausgedehnter tropischer Plantagen für diese Frucht existieren. Im Jahre 2020 wurden weltweit 27,8 Mio. t³⁷ Ananasfrüchte geerntet. Zu den Hauptproduzenten zählen Costa Rica, die Philippinen und Brasilien. Insbesondere großflächige Monokultu-

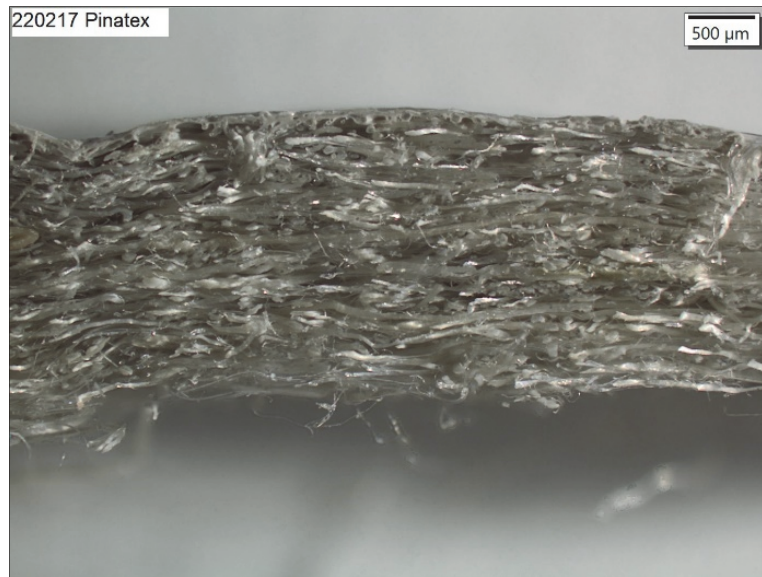


Abbildung 16: Querschnitt Piñatex (Lichtmikroskop)

ren, wie z. B. beim Weltmarktführer Costa Rica würden den Übergang vom Manufakturbetrieb zu einer industriellen Verarbeitung begünstigen. Eine Industrieproduktion würde weitreichende umwelttechnischen Maßnahmen erzwingen, um die aufskalierten Umweltbelastungen einzudämmen. So sind z. B. bei einer massenhaften Extraktion und Isolierung der Zellulosefasern aus den Ananasblätter (Waschen, Degummieren, Kardieren) Abwasserfrachten zu erwarten, wie sie in vergleichbaren Industriezweigen (Textil, Zellstoff, Papier) auftreten. Eine Produktökobilanz einschließlich einer Aussage zur Substitutionswirkung dieses Produkts wäre erst auf diesem Niveau aussagekräftig. Das Trendsustitut weist hinsichtlich des Energieverbrauchs ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Kernbereich und Vorketten auf.

Ein besonderer Aspekt, welcher nicht oder nur schwer dargestellt werden kann, ist der Verlust an Bodenfruchtbarkeit. Ernteabfälle werden meist als verrottende Biomasse oder als Pflanzenasche dem Boden wieder zugeführt. Ein permanenter Entzug macht eine verstärkte Bodenverbesserung und zusätzliche Düngung erforderlich, was zwangsläufig auf die Ökobilanz rückwirkt. Ananasplantagen sind außerdem mit einem hohen Pestizideinsatz verbunden. Ob und in welchem Maße diese Substanzen dem Produktpfad des Koppelprodukts folgen, ist ungeklärt. Eine Anfrage an den Hersteller zum Thema Ökobilanz blieb unbeantwortet.

³⁷ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1249600/umfrage/erntemenge-von-ananas-weltweit/> Stand:23.08.2022

Die dritte Gruppe von Trendsustituten - Anwendung neuer biopolymerer Rezepturbausteine - kann ihrem Ursprung nach weder als tierisches noch als pflanzliches Produkt eingestuft werden, da Pilze

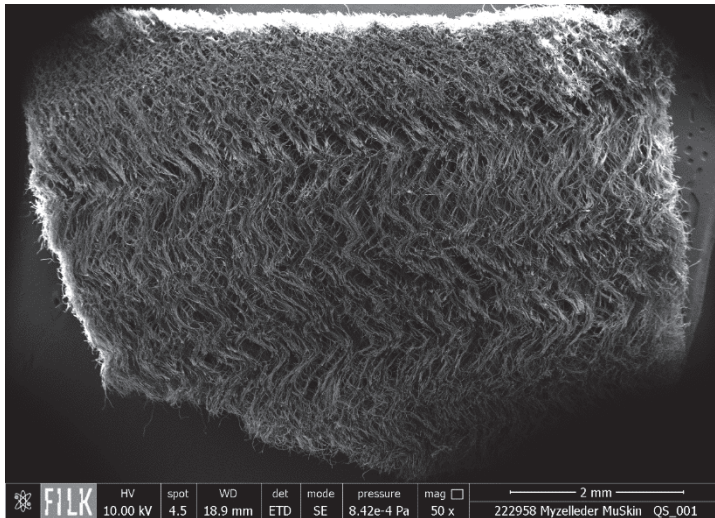


Abbildung 17: Produktquerschnitt Muskin (REM, 50-fach)

eine eigenständige Gruppe von Organismen bilden. Pilze werden seit frühester Zeit durch den Menschen biotechnologisch genutzt. Die Verwendung als Konstruktionswerkstoff, z. B. von Baupilzen wie Zunderschwamm, *Fomes fomentarius*, zählt dazu (Abbildung 17). Pilzmyzel enthält als Hauptkomponente das Polysaccharid Chitin, dem weltweit zweithäufigsten Biopolymer nach Zellulose. In den Stoffkreisläufen der Biosphäre übernehmen Pilze in Wechselwirkung mit den Produzenten (Organismen mit autotropher Photosynthese) und den Konsumenten (Organismen mit heterotropher Assimilation) die Rolle der Destruenten. Ihr Stoffwechsel kann saprophytischer, symbiontischer oder parasitärer Natur sein.

Im Hinblick auf eine industrielle Anwendung als Substitut für Polsterleder oder -kunstleder scheiden hier viele Lösungen von vornherein aus, da die Ressourcen keine industrielle Nutzung zulassen, die Produktivität das Niveau handwerklicher Liebhaberei kaum übersteigt, die Flächenausbeute für den Zuschnitt unzureichend ist oder die geforderten Gebrauchseigenschaften nicht erfüllt werden.

Für die gezielte Massenkultivierung von Pilzmyzel stehen grundsätzlich zwei verfahrenstechnische Prinzipien zur Verfügung³⁸. Die erste Variante arbeitet submers. Suspensionen, bestehend aus der Starterkultur, Nähr- und Spurenstoffen werden in klassischen Biofermentern angesetzt. Nach ausreichender Biomasseanreicherung folgt eine Entwässerung und Filmbildung in Anlehnung an Technologien der Papier- und Zellstoffindustrie. Der zweite Weg beruht auf der Anzucht von Pilzgeflecht in Zuchtkammern auf Feststoffschüttungen wie z. B. Schichten aus Sägespänen oder Reisspelze.

Myzelhaltige Ledersubstitute werden z. Z. von US-amerikanischen Firmen wie z. B. Bolt Threads Inc. (**Mylo™**), Ecovative Design LLC (**AirMycelium™**) und MycoWorks Inc. (**Fine Mycelium™**) oder dem niederländischen Unternehmen Mycelium Materials Europe B.V. (**MyFoam®**) entwickelt und angeboten. Die industrielle Kultivierung und Verarbeitung von Pilzgeflechten als Flächenwerkstoff stellt eine echte Innovation jüngeren Datums dar.

Myzelhaltige Ledersubstitute werden z. Z. von US-amerikanischen Firmen wie z. B. Bolt Threads Inc. (**Mylo™**), Ecovative Design LLC (**AirMycelium™**) und MycoWorks Inc. (**Fine Mycelium™**) oder dem niederländischen Unternehmen Mycelium Materials Europe B.V. (**MyFoam®**) entwickelt und angeboten. Die industrielle Kultivierung und Verarbeitung von Pilzgeflechten als Flächenwerkstoff stellt eine echte Innovation jüngeren Datums dar.

³⁸ <https://www.nzz.ch/wissenschaft/veganes-lederimitat-pilz-statt-tierhaut-ld.1576726?reduced=true> Stand: 23.08.2022

Für den Aufwuchs des Myzels werden organische Substrate wie Kartoffelstärke, Dextrose, Maltose, Lignin, Getreidekorn sowie Sägemehl, Agar, Zellulose und Zelluloseabbauprodukte sowie anorganische Nährsalze (NH_4NO_3 , NH_4Cl , MgSO_4 , CaCO_3 , Na_3PO_4 u. a.) benötigt.

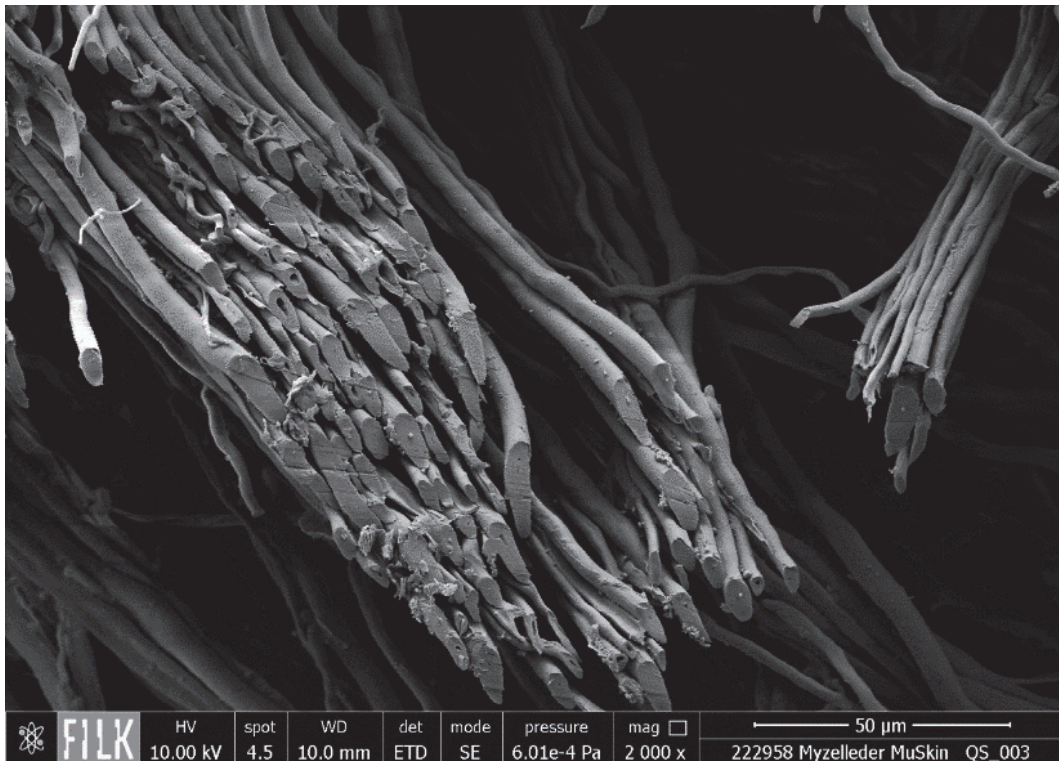


Abbildung 18: Myzelstränge Produkt MuSkin (REM, 2.000-fach)

Die Substrate müssen vor dem Animpfen mit einem geeigneten Inokulum pasteurisiert (60 ... 90°C) oder sterilisiert (1 bar, 120 °C, 20 min) werden. Eine hohe Biomasseausbeute in wenigen Tagen wird nur mit kalorienreichen Substraten wie z. B. Weizenkorn /17/ und unter optimalen Bedingungen hinsichtlich Klima (Temperatur, Feuchte) und Atmosphäre (CO_2 -Begasung) erzielt. Je nach Randbedingungen entstehen reine Myzelmatten oder Komposite durch die innige Durchdringung eines textilen Trägers durch die Hyphen des Pilzes (WO2020/047458 A1³⁹, US9485917, US2016/0302365, US2013/0263500).

Sind Pilzmatten von ausreichender Stärke herangewachsen, werden diese geerntet, biologisch inaktiviert, dickenreguliert, getrocknet, verdichtet, geglättet und oberflächenveredelt. Pilzmyzel (Abbildung 18) enthält hauptsächlich Chitin (15 ... 40 %), ein stickstoffhaltiges Polysaccharid, welches im Gegensatz zu Kollagen hydrophob ist und über wenig funktionelle Gruppen verfügt. Diese Merkmale erschweren die Veredelung mit weiteren Hilfsmitteln (Färben, Fetten), engen das Eigenschaftsspektrum des Endprodukts ein und erhöhen bei schwacher Bindung der Hilfsmittel an das Substrat die spezifische Abwasserfracht.

³⁹ Anmelder Modern Meadow inc. (Priority data: 31. August 2018)

Als Ausweg wird die partielle Deacetylierung zu Chitosan gesehen. Die 2-Acetamidogruppe des Chitins wird hierbei durch eine Aminogruppe ersetzt.

Für die Anwendung als strapazierfähiges Möbelbezugsmaterial kann eine Imprägnierung mit polymeren Bindern wie EVA, PAE, BK, SBK, Naturlatex u. a. und eine zusätzliche Verstärkung mit textilen Trägern die mechanischen Eigenschaften von Myzelgeflechten wesentlich verbessern. Auch Komposite mit natürlichen oder synthetischen Textilien liefern hohe Festigkeiten und wirken anisotropen Eigenschaften entgegen. Weichmacher (anionische Fettlicker, PET, Glycerin, Sorbitol, Leinöl), Vernetzer (Glutardialdehyd, Chrom-III-sulfat), Farben (Säure- und Direktfarbstoffe), Pigmente und Coatings (PU, Acrylate, Wachse) erzeugen eine lederähnliche Optik und Haptik (US 2018/0282529A1) und erhöhen die Verschleißfestigkeit der Oberflächen. Diese Modifizierungen entsprechen in weiten Teilen der Nass- und Endzurichtung von Leder. Desodorierende Chemikalien sollen unangenehme Eigengerüche überdecken.

Die Herstellung von Ledersubstituten auf fixen Trägern wird u. a. in US2020/0120880A1⁴⁰ beschrieben. Bevorzugt werden holzerstörende Braun- und Weißfäulepilze der Ordnung Polyporales (*Ganodermas*, *Trametes* u. a.). Klimakammern enthalten Aufwuchsflächen mit dem Nährsubstrat, eine permeable Membran darüber trägt das Inokulum, welches wiederum durch eine poröse Matte (Sieb, Gewebe, Vlies) - wahlweise aus synthetischen oder Naturfasern - abgedeckt wird. Die Temperierung und Begasung der Kammern mit Wasserdampf, CO₂, N₂ und O₂ erfolgt von außen. Für einen optimalen Stoffaustausch muss das Substrat einen flächenspezifischen Lückengrad von 1,5 ... 3,0 ml·cm⁻² aufweisen. Die Umgebungsbedingungen sollen das vegetative Myzelwachstum fördern, jedoch ganz im Gegensatz zur Zucht von Speisepilzen die Ausbildung von Fruchtkörpern oder deren Vorstufen vollständig unterdrücken, da sie inhomogene Endprodukte und Fehlstellen erzeugen. Die optimalen Randbedingungen für das Wachstum von Myzel werden wie folgt beschrieben:

O ₂	<	20 Vol%
CO ₂	=	30.000 ... 100.000 ppm
T	=	29 ... 35 °C
H	=	40 % rF
t _{Aufwuchs}	=	5 ... 14 d

Als organisches Substrat kommen Sägespäne aus Hart- und Weichhölzern, Getreidekorn sowie zusätzliche stickstoffreiche Substrate wie z. B. Kollagenhydrolysat (WO2020/047458⁴¹) zum Einsatz. Antibiotika sollen bakterielle Querkontaminationen verhindern (WO2020/086907A1⁴²).

⁴⁰ Inhaber: Mycoworks inc.

⁴¹ Inhaber: Modern Meadow inc.

⁴² Inhaber: Myco Works inc.

Da für eine praktische Qualitätsprüfung keine Muster zur Verfügung standen, sei beispielhaft auf Angaben zur Mechanik eines zu einem Oberledersubstitut (Sneaker) aufbereiteten Myzelmaterials verwiesen. Die Prüfwerte zeigen eine hohe Variabilität in den mechanischen Parametern und eine im Vergleich zu Leder geringe Zugfestigkeit bzw. max. Weiterreißkraft (Tabelle 21):

Tabelle 21: Testergebnisse für aufbereitete Myzelmatte nach WO2020/102552A1⁴³ (Treatment A)

Parameter	\bar{x}	s	Einheit	Methode
d	2,6	± 0,4	mm	ASTM D1813
ρ	0,6	± 0,1	g·cm ⁻³	-
E _{Anfangs}	32,0	± 23,0	MPa	ASTM D638 (Anfangszugmodul)
σ _{Zugfestigkeit}	2,9	± 1,3	MPa	ASTM D638 (modifiziert)
ε _{Bruchdehnung}	62,4	± 19,7	%l ₀	ASTM D638 (modifiziert)
F _{Weiterreißfestigkeit max.}	22,4	± 6,3	N	ASTM D4704
F _{Stichausreißfestigkeit 1}	40,0	± 9,2	N	ASTM D4786 (einfach)
F _{Stichausreißfestigkeit 2}	62,3	± 13,6	N	ASTM D4786 (doppelt)
m _{Absorption}	169,4	± 38,3	%	ASTM D6015 (Wasseraufnahme)

Für einen problemlosen Zuschnitt für Teile von Polstermöbeln müssen Myzelmatte fehlerfreie Mindestflächen liefern. Gerüche, Schädlingsbefall (Milben), bedenkliche mikrobiologische Kontaminationen durch Bakterien, Pilze (Mykotoxine) sowie das Auftreten von Allergenen (Sporen, Hyphen, Enzyme) sind auszuschließen. Außerdem unterliegen viele Möbelbezugsstoffe speziellen Lieferbedingungen wie z. B. dem Flammenschutz. Festzuhalten bleibt außerdem, dass saprophytische Pilze weder eine vegetabile Rohstoffquelle noch eine CO₂-Senke darstellen – im Gegenteil – die Technologie erfordert eine technische CO₂-Begasung.

Eine Anfrage bei der Fa. Bolt Threads inc., ergab, dass das Produkt Mylo[®] als "sustainable vegan mycelium leather" derzeit nicht die Anforderungen für Möbelleder erfüllt. Angaben für eine Ökobilanz konnten zum Zeitpunkt der Anfrage nicht bereitgestellt werden. Die Erstellung der Ökobilanz für einen myzelbasierten Lederersatz, vergleichbar mit dem Produkt Mylo, wurde deshalb aus den Erfinderbeschreibungen abgeleitet. Da für die chemische Modifizierung und die weitere Veredelung der Rohmatten ebenfalls keine Daten vorlagen, wurden Durchschnittswerte für die Nass- und Endzurichtung von chromgegerbten Möbelleder herangezogen.

Auffällig in der Bilanz ist der sehr hohe spezifische Energiebedarf. Er ergibt sich in erster Linie aus der Tatsache, dass die Erfindungsbeschreibungen von einer Prozessführung im Labormaßstab ausgehen. Abhilfe soll hier die Übernahme niederländischen Know-hows (Dutch Shelf System für die Champignonzucht)⁴⁴ schaffen.

⁴³ Inhaber: Bolt Threads inc.

⁴⁴ <https://www.ecotextile.com/2022030129019/materials-production-news/bolt-threads-looks-to-scale-mylo-production.html> Stand: 23.08.2022

Durch dieses Scale-up soll der Durchbruch in den industriellen Maßstab hinsichtlich Energieeffizienz und Produktivität gelingen. Dessen ungeachtet bleibt zu bedenken, dass auch bei einem biotechnologisch durchrationalisierten Prozess ohne eine Verkürzung der Prozesskette in Zeit und Raum weiterhin mit einem vergleichsweise hohen spezifischen Energieverbrauch zu rechnen ist. Die Technologie umfasst bereits für die Kultivierung zwei thermischen Behandlungsstufen von Substrat und Myzel. Auch das Myzelwachstum selbst ist energieintensiv, da die Wachstumsperiode von ein bis zwei Wochen eine aufwendige Klimatisierung, Befeuchtung und Begasung verlangt. Ein hoher spezifischer Energieverbrauch ist nicht zuletzt auch mit der Endzurichtung der Myzelmatte (Filmbildung und Vernetzung des Finishes) verbunden. Wird außerdem eine Behandlung des Rohmyzels mit reinen Primäralkoholen durchgeführt (US2018/0282529A1), so überhaupt großtechnisch realisierbar (Ex-Gefahr), wäre dies nur unter Anwendung einer Lösemittelrückgewinnung (Rektifikation) denkbar. Damit würde die Herstellung einen vierten energieintensiven Prozessabschnitt umfassen. Unberücksichtigt bleibt in der Bilanz der spezifische Flächenverbrauch für die Pilzzucht selbst.

5.6 Diskussion und Schlussfolgerungen

Im Verlaufe der letzten Jahrzehnte verschoben sich die Schwerpunkte des Umweltschutzes von Entsorgungsfragen (End-of-Pipe-Technologien) zu einem prozessintegrierten Umweltschutz; von Ressourcenfragen (nachwachsende Rohstoffe) zu Fragen der Energieeffizienz und anthropogener Klimafaktoren (Carbon Footprint). Sie mündeten in der Betrachtung ganzer Lebenszyklen (LCA) von Produkten. "Nachhaltigkeit" (Sustainability) wurde zur Leitvokabel im gesamten Wirtschaftsleben. Dieser allgegenwärtige Begriff geht auf Johann Hannß Carl von CARLOWITZ zurück, der diese Handlungsmaxime erstmals 1713 in seiner "Sylvicultura Oeconomica" formulierte /5/ (Abbildung 19). Als Freiburger Oberberghauptmann unterstand ihm das seinerzeit größte Montanrevier Europas.

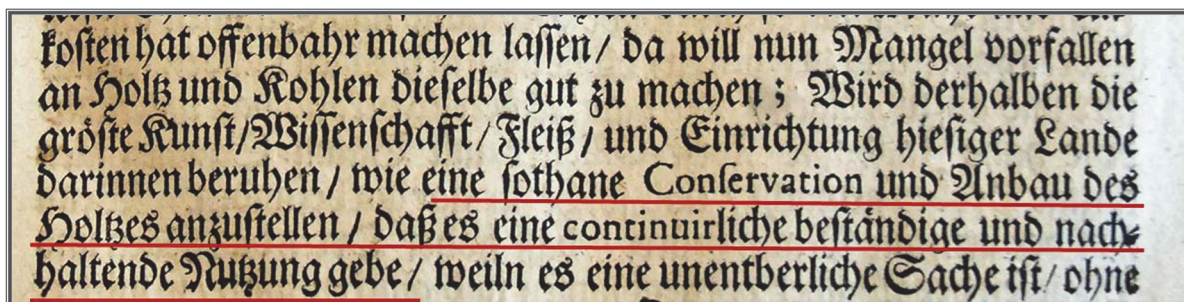


Abbildung 19: Ausschnitt aus der Sylvicultura Oeconomica

Das Konzept der Nachhaltigkeit entwickelte von CARLOWITZ während einer dramatischen Rohstoff- und Energiekrise, welche die Bergwerke und Schmelzhütten des Erzgebirges an der Wende zum 18. Jahrhundert traf, ausgelöst durch den exzessiven Verbrauch nachwachsender Rohstoffe wie Holz, Torf, und Holzkohle. Als hoher kursächsischer Staatsdiener verbanden sich seine Motive mitnichten mit Naturromantik, der Sorge um das Wohl von Nutztieren, Veganismus oder Orthorexie⁴⁵. Sie gründeten sich vielmehr auf nüchterne Überlegungen zur langfristigen Sicherung natürlicher Ressourcen für die Wirtschaft seines Landes. Im Gegensatz zu anderen Disziplinen des Umweltschutzes wie z. B. der Ökotoxikologie, dem Gewässerschutz, dem Artenschutz usw. ist das nachhaltige Wirtschaften in erster Linie mit großen Zahlen hinsichtlich Quantität, Raum und Zeit verknüpft. Alternative Trends substitute, die den Anspruch erheben, konventionelle Produkte ersetzen zu wollen, müssen ihre volkswirtschaftliche Relevanz, insbesondere die Ressourcenmächtigkeit ihrer Rohstoffbasis, nachweisen können. Eine Ökobilanz muss bei der Eingrenzung von Faktoren und Wirkungen diesem Zusammenhang Rechnungen tragen. Der Erzeugung nachwachsender Rohstoffe sind räumliche und zeitliche Grenzen gesetzt. Ihre Gewinnung ist wetter- und klimaabhängig und durch geringe raum- und zeitbezogene Ausbeuten und Stoffstromdichten gekennzeichnet (Hektarertrag, Flächeneffizienz). Ihre Einsatzmöglichkeiten sind gegenüber fossilen Rohstoffen eingeschränkt; ihre Verarbeitung von spezifisch höheren Energieverbräuchen begleitet. Die Produktion auf Basis nachwachsender Rohstoffe darf zudem nicht mehr fossile

⁴⁵ zwanghafte Fixierung auf den Verzehr von als besonders gesund definierten Nahrungsmitteln

Energieträger beanspruchen als im konventionellen Vergleichsprodukt selbst und seiner Herstellung gebunden sind, will sie tatsächlich als nachhaltig gelten. Für den Produzenten und mehr noch den Konsumenten muss die Erfüllung ökologischer Normative transparent nachvollziehbar sein. Durch die besondere Methodik des Vorhabens (Prinzip von PARETO) wurden die maßgeblichen Einflussfaktoren im Sinne eines zweckgebundenen Modells (Produktvergleich) verdichtet und ein vereinfachtes Abbild von Ausschnitten der Wirklichkeit hergestellt. Die Zahl der untersuchten Umweltwirkungen wurde zusammengefasst, wobei auf eine gleichmäßige Abdeckung aller Bereiche und die gegenseitige Unabhängigkeit (Gültigkeit des Prinzips von PARETO) geachtet wurde.

Das Streben nach Modellen mit einer Maximalzahl an Parametern scheitert meist an fehlenden Ressourcen und ist kein Garant für ein genaues Abbild der Wirklichkeit. Wie bei jedem Modell entstand mit dem Vorhaben ein Provisorium von begrenztem Nutzen. Die völlige Gleichsetzung mit der Realität würde die Unterscheidung zwischen Science und Fiktion aufheben. Der Informationsgehalt der recherchierten und berechneten Daten beruht in erster Linie nicht auf ihrer Absolutheit. Vielmehr basiert der Erkenntnisgewinn auf der Einheitlichkeit von Methode und Interpretation der betrachteten Produktionssysteme in Proportion zueinander. Sie heben Stärken und Schwächen der beschriebenen Werkstoffe und Produkte für die verschiedenen Umweltaspekte heraus. In diesem Sinne zeigt der Vergleich, dass eine verbesserte Nachhaltigkeit nicht durch die Minimierung oder Maximierung eines Faktors erreicht wird, sondern durch eine schrittweise Optimierung entlang der gesamten Wertschöpfungskette entsteht. Die Auswirkungen sind für jeden einzelnen Umweltaspekt gesondert zu betrachten. Sie können nicht pauschalisiert werden. So würde bspw. die Aufrechnung des Carbon Footprint mit dem Wasserfußabdruck eines oder mehrerer Produktsysteme keinen Sinn ergeben.

Die Aussagekraft von Ökobilanzen wird häufig missdeutet. Die Konsumgüterbranche zeigt hier eine besondere Affinität zu allumfassenden Maßzahlen wie z. B. der Higg Materials Sustainability Index (Higg MSI)⁴⁶ im Bekleidungs- und Ledersektor. Eindimensionale Wertungen stellen eine unzulässige Simplifizierung dar und werden von Verbraucherschutzorganisationen als Greenwashing abgemahnt⁴⁷. Nach DIN EN ISO 14040/44 existiert *"keine wissenschaftliche Grundlage, Ergebnisse von Ökobilanzen übergreifend zu einer numerischen Rangfolge oder zu einem numerischen Einzelwert zusammenzufassen"*. Ihre Ergebnisse werden stark vom Umfang und Qualität ihrer Daten und den gewählten Modellen und Methoden bestimmt. Besteht für die Recherche der Zwang, nicht frei zugängliche Datenbanken zu nutzen, werden Regeln der Transparenz verletzt.

⁴⁶ <https://fashionunited.de/nachrichten/business/der-higg-index-chancen-und-grenzen-der-messung-von-nachhaltigkeit-in-der-modebranche/2021110843632> Stand: 29.08.2022, Die SAC-Organisation (Sustainable Apparel Coalition) ist ein Bündnis von NGO und Unternehmen, zu denen u. a. Asos, Inditex und H&M gehören. 2011 wurde der Higg-Index zur Messung der Nachhaltigkeit von Mode geschaffen.

⁴⁷ https://internationaleleathermaker.com/news/fullstory.php/aid/11555/H_M_to_make_U-turn_on_greenwashing.html Stand: 16.09.2022, Die niederländische Aufsichtsbehörde für Verbraucher und Märkte (ACM = Autoriteit Consument en Markt, Sitz Den Haag) führte eine Untersuchung zu Marketingpraktiken hinsichtlich Nachhaltigkeit von Produkten der Marken Decathlon und H&M durch.

Die für das Vorhaben betriebene Datenrecherche zu alternativen Trendsustituten wurde durch eine schlechte Datenlage und mangelnde Kooperationsbereitschaft der Anbieter behindert. Während das Thema Umweltschutz in Bezug auf die Werkstoffe PVC und Leder Bibliotheken füllt, stehen die Anbieter alternative Trendsustitute gegenüber dem Verbraucher in einer Bringschuld. Der bloße Verweis auf die Verwendung eines bestimmten nachwachsenden Rohstoffs innerhalb eines Produktsystems stellt kein aussagekräftiges Argument für oder gegen Nachhaltigkeit dar. Das Fehlen von industriell betriebenen Produktionslinien für Trendsustitute erschwert zusätzlich die Erstellung von vergleichenden Produktökobilanzen.

5.7 Kennzahlen und Produktregeln (PCR)

Umweltspezifische Kennzahlen, die dem Ökobilanz-Ansatz nach ISO 14031 A. 3.2.3 folgen, bewerten die Umweltleistung eines Produkts nach dem Input-Output-Prinzip und wählen als Kennzahlen die wichtigsten Umweltaspekte und Umweltwirkungen entlang des Lebenswegs aus. Die Kennzahlen können als skalierbare Größe oder als Ausschlusskriterien (ja/nein-Entscheidung) angelegt sein. Letztere sind bei der Planung einer vergleichenden Ökobilanz für ein neues Produkt nützlich, um zu entscheiden, ob der damit verbundene Aufwand überhaupt gerechtfertigt ist. Ausgangspunkt bildet die Festlegung eines bekannten Produktsystems als Vergleichsmaßstab.

Die aus dem Kernprozessen gewonnenen Daten sind in erster Linie operative Leistungskennzahlen und dienen primär dem Unternehmensmanagement. Mit der Cradle-to-Gate- und der Cradle-to-Grave-Analyse werden in die Ökobilanz außerdem Umweltzustandsindikatoren eingefügt. Sie liefern verständliche und zweckdienliche Daten zur Umweltqualität für Kunden, Investoren o. a. interessierte Kreise.

Produktregeln für ökologisch vergleichende Aussagen fixieren die methodischen Spielräume, um einen fairen Vergleich zu garantieren. Verallgemeinerungen für ganze Produktkategorien sind zu vermeiden. Zu Beginn jeden Vergleiches sollte seine Sinnhaftigkeit und sein Nutzen erörtert werden. Die erste Entscheidung fällt hinsichtlich der Gebrauchseigenschaften. Ein Alternativprodukt kann nur dann als nachhaltig gelten, wenn es gebrauchstauglich ist. Die Erfüllung aller **Gebrauchseigenschaften** als Möbelbezugsmaterial stellt im vorliegenden Falle ein kompromissloses Kriterium für eine vergleichende Ökobilanz dar. Die Qualitätsparameter des Standardprodukts, gesetzliche und Branchenvorgaben bilden dabei die umweltspezifischen Kennzahlen (s. Kapitel 5.4, Tabelle 19). Erfüllt das Produkt unstrittig alle Eigenschaften, steht die Frage nach Kapazitäten und Rohstoffen. Die betrachtete Technologie muss **industrietauglich** sein und sich auf **Ressourcen** stützen, die der Produktivität des Vergleichsprodukts entspricht und vergleichbare Mengen liefert. Als Kennzahl **Substitutionsrate** kann das Verhältnis der Produktivitäten **Substitut : Standardprodukt** dienen. Ist dieses Verhältnis $\ll 1$, ist zu hinterfragen, ob ein Vergleich zulässig ist. Diese Situation ergibt sich typischer Weise für handwerklich

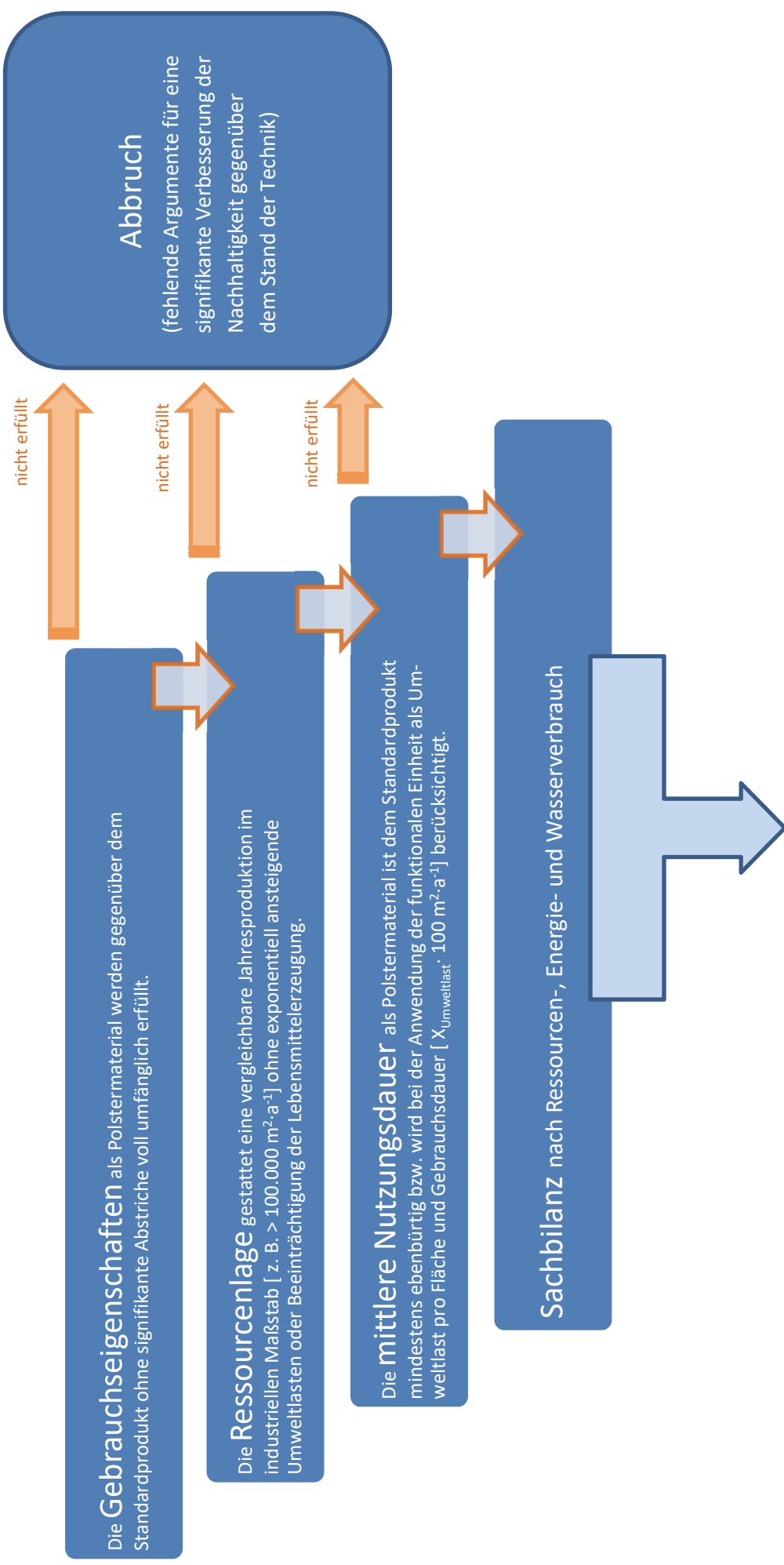
oder im Manufakturbetrieb produzierte Artikel für Nischenmärkte. Eine fehlende oder unzureichende **Rohstoffbasis** stellt in jedem Falle ein Abbruchkriterium dar.

Werden nachwachsende Rohstoffe im großen Stil eingesetzt, dürfen diese nicht mit der Erzeugung von Nahrungsmitteln in Konkurrenz treten, Monokulturen erzwingen, zum Raubbau oder den Verlust natürlicher Habitate führen oder anderweitig in Konflikt mit dem Naturschutz geraten. Aus diesem Grunde stellen z. B. Baumwolltextilien ("Organic Cotton", "Bio-Canvas") oder Palmölprodukte mit oder ohne Zertifikat einen ökologischen Wegschritt dar. Die Falsifikation eines als ökologisch und nachhaltig deklarierten Polstermaterials zweifelhafter Herkunft ist mit geringen Erfolgchancen verbunden /28/. Möbelbezugsstoffe sind einem ständigen Verschleiß und äußeren Umweltfaktoren ausgesetzt. Ihre Gebrauchsdauer sollte sich nach Jahren bemessen. Je nach Werkstoff (Textil, Leder, Kunstleder) unterscheiden sich die Erwartungen an die mittlere **Nutzungsdauer**. Eine Produktökobilanz muss diesen Faktor zwingend Rechnung tragen:

"Allgemein liegt ein umweltgerechtes Produkt vor, wenn es im Vergleich zu konventionellen Produkten den erforderlichen Gebrauchsnutzen erfüllt, bei der Herstellung, Anwendung und Entsorgung weniger Ressourcen verbraucht und die Umwelt weniger belastet. Hierbei ist die Nutzungsdauer einzubeziehen." *aus UBA-Texte 38/92*

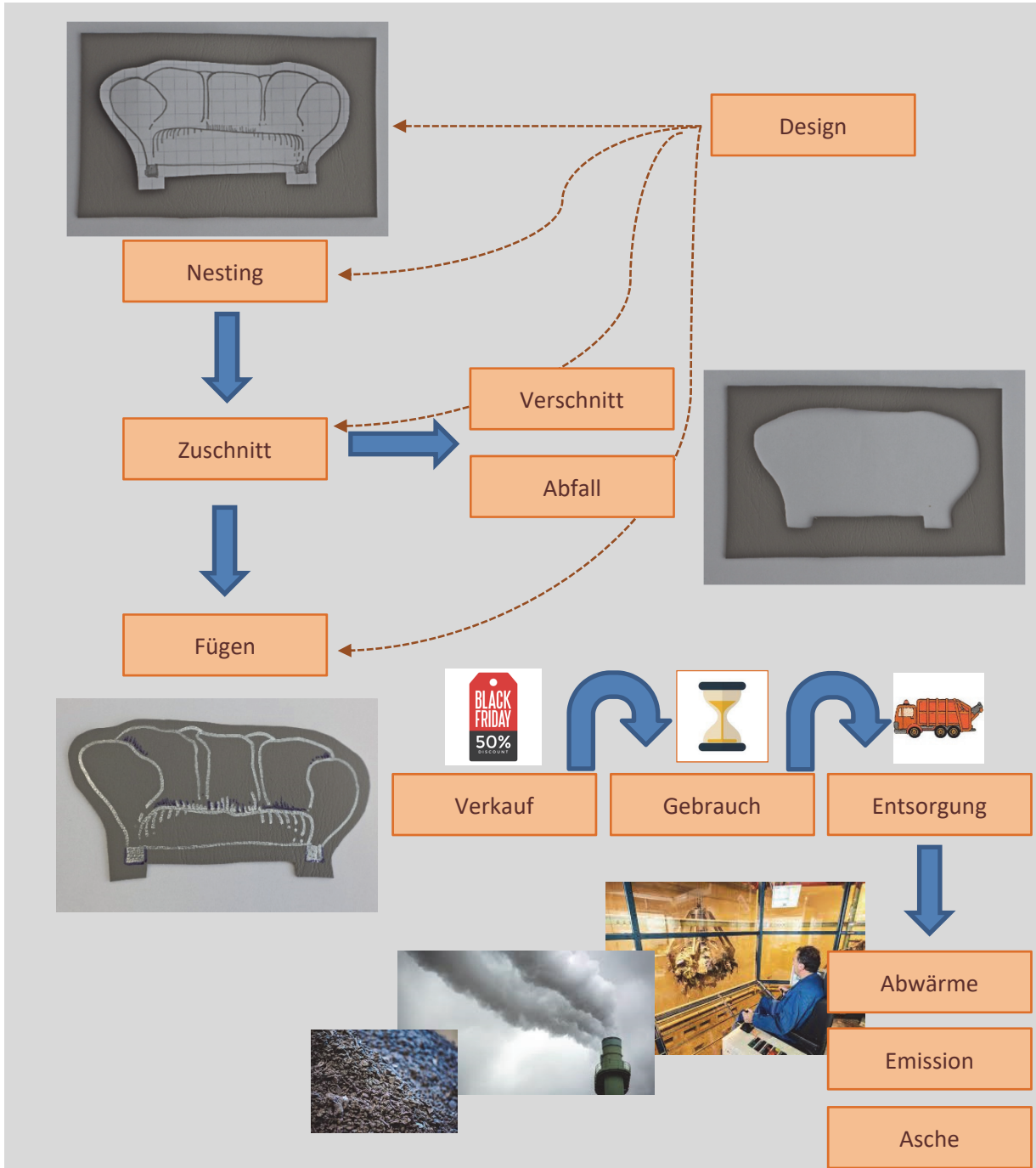
Um die Nutzungsdauer eines Möbelbezugsmaterial in die Ökobilanz einfließen zu lassen, muss diese über die Systemgrenze der Cradle-to-Gate-Analyse hinausgehen und die Verarbeitung zu einem Möbelstück und dessen Gebrauch betrachten. Da das Bezugsmaterial von allen Komponenten dem stärksten Verschleiß ausgesetzt ist, bestimmt dieser Werkstoff auch die Nutzungsdauer des Gesamtprodukts, so lange der moralische Verschleiß oder die Aufarbeitung durch einen Polsterer keine Rolle spielen. Das Verhalten der Konsumenten entfaltet somit einen enormen Einfluss, der durch eine Produktökobilanz nicht abgebildet wird.

Die **Verarbeitung** der Polstermaterialien stellt ebenfalls einen außerordentlichen Einflussfaktor auf die Produktökobilanz dar. Auch für ein identisches Endprodukt variiert der Verarbeitungsaufwand in Abhängigkeit vom eingesetzten Material und dem gewählten **Design**. Dabei spielt der **Verschnitt** eine überragende Rolle hinter dem sich Unterschiede, die sich aus Fügeverfahren für die verschiedenen Polstermaterialien ergeben (z. B. Nähen, Kleben, Tacks, HF-Schweißen etc.), zurücktreten. Die Frage nach einem Recycling stellt sich nicht, da Möbelbezugsmaterialien als Bestandteil von Mischabfällen eine nachrangige Rolle spielen. Das folgende Fließschema illustriert die beschriebene Herangehensweise und die Entscheidungskriterien notwendiger und hinreichender Bedingungen, bevor die eigentlichen Arbeiten zu den Sachbilanzen beginnt. Hierfür stehen die in Kapitel 5.2 und 5.3 herausgearbeiteten **ressourcen- und wirkmächtigen Umweltaspekte** als Kennzahlen.



Vergleichende Produktökobilanz (Cradle to Gate)

Die einzelnen Ökobilanzen werden zu einem abschließenden Vergleich der betrachteten Produktsysteme und ihrer Umweltauswirkungen zusammengeführt, analysiert und die Grenzen ihrer Aussagekraft dargelegt. Die Systemgrenze Cradle-to-Gate kann durch den Verarbeiter eines Leders oder Kunstleders auf eine Cradle-to-Grave-Analyse erweitert werden, wie das folgende Schema zeigt:



Ausgehend von der funktionalen Einheit der Cradle-to-Gate-Analyse werden alle Umweltauswirkungen ab hier auf ein Jahr Nutzungsdauer normiert. Dabei fließen der Verschnitt, die Gebrauchsdauer und die Entsorgung am Ende des Lebensweges des Konsumguts in die Analyse ein.

Als Beispiel für einen derartigen Vergleich Cradle-to-Grave dienen die nachfolgenden Modellrechnungen für einen fiktiven Dreisitzer. Design und Polsterfläche wurden für alle 5 Polstermaterialien als identisch angenommen. Untersucht wurden der Einfluss von Verschnitt und Gebrauchsdauer an Hand festgelegter Modellwerte.

Tabelle 22: Modellannahmen Cradle-to-Grave-Analyse für einen Dreisitzer

Parameter	VOWAled Pisa	VOWAled Palm Beach	HELLER-Leder Blattwerk	HELLER-Leder Onstage! CF	HELLER-Leder Classic	Einheit
Polsterfläche pro Einheit A_i	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	$m^2 \cdot \text{Einheit}^{-1}$
Verschnitt pro Einheit ΔA_V	40,0	40,0	60,0	50,0	50,0	%A
Bruttofläche pro Einheit $A_{i\Sigma}$	15,0	15,0	22,5	18,0	18,0	$m^2 \cdot \text{Einheit}^{-1}$
Anzahl Produkteinheiten n'	6,7	6,7	4,4	5,6	5,6	Einheiten $\cdot 100 m^2$
Mittlere Nutzungsdauer $t_{N\emptyset}$	4,0	5,0	16,0	13,0	13,0	a $\cdot \text{Einheit}^{-1}$
Kumulierte Nutzungsdauer $t_{N\Sigma}$	26,7	33,3	71,1	72,2	72,2	a $\cdot 100 m^2$

Bei der Verarbeitung der beiden Kunstleder wurde ein identischer Verschnitt von 40 % unterstellt. Die Festlegung der Gebrauchsdauer lehnte sich an Angaben aus AfA- u. a. Abschreibungstabellen an. So wird bspw. im Gastgewerbe eine Nutzungsdauer von 5 Jahren unterstellt⁴⁸. Für das Semianilinleder Blattwerk ist von einem hohen Verschnitt auszugehen, da das natürliche Narbenbild gut sichtbar ist und somit auch alle Naturmerkmale und Fehlstellen. Es wurde eine lange Gebrauchsdauer von 16 Jahren postuliert, da Anilin- und Semianilinleder in der Regel gut strukturiert sind, pfleglich behandelt werden und das vorzeitige Ablösen von Zurichtschichten technologiebedingt entfallen. Im Vergleich zu Anilinleder ist beim Nesting vollständig zugerichteter Leder eine höhere Flächenausbeute zu erwarten. Für die beiden Heller-Leder Onstage! CF und Classic wurde deshalb mit einem Verschnitt von 50 % gerechnet. Ihre Gebrauchsdauer wurde mit 13 Jahren an die Abschreibung von Büromöbeln angelehnt⁴⁹. Aus den so formulierten Eckdaten wurden die Bruttofläche $A_{i\Sigma}$ und nachfolgend die Zahl der Dreisitzer n' berechnet, welche aus $100 m^2$ Material produziert werden können. Aus der Anzahl der Produktionseinheiten n' und der angenommenen mittleren Nutzungsdauer $t_{N\emptyset}$ folgte die kumulierte Nutzungsdauer $t_{N\Sigma}$ (s. Tabelle 22, Formel 1).

$$t_{N\Sigma} = \frac{(100 - \Delta A_V)}{A_i} * t_{N\emptyset} \quad [a] \quad \text{Formel (1)}$$

⁴⁸ https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Steuern/Steuerverwaltung-Steuerrecht/Betriebspruefung/AfA_Tabellen/afa_tabellen.html Stand: 18.10.2022

⁴⁹ <https://davea.de/bueromoebel-richtig-abschreiben/> Stand: 18.10.2022

Tabelle 23: P80-Ressourcenverbrauch pro Nutzungsjahr für einen Dreisitzer (Cradle-to-Grave), Modellrechnung

Parameter	VOWAled Pisa	VOWAled Palm Beach	HELLER-Leder Blattwerk	HELLER-Leder Onstage! CF	HELLER-Leder Classic	Einheit
petrochemische Rohstoffe	≥ 1,6	5,5	1,0	-	-	kg·a ⁻¹
mineralische Rohstoffe	≥ 1,2	1,4	3,9	2,4	2,8	kg·a ⁻¹
nachwachsende Rohstoffe	≥ 0,2	2,0	14,6	10,5	8,8	kg·a ⁻¹
Flächenverbrauch (Agrar/Forst/Bergbau)	≥ « 0,001	0,6	121,6	115,8	8,4	m ² ·a ⁻¹
Biozideinsatz	≥ 0,0	0,001	0,04	0,04	0,004	kg·a ⁻¹
Grund- und Oberflächenwasser	≥ 0,3	0,5	0,7	0,4	0,4	m ³ ·a ⁻¹
Energiebedarf	≥ 103,9	299,7	50,0	52,9	71,7	MJ·a ⁻¹
	= 28,9	83,3	13,9	14,7	19,9	kWh·a ⁻¹

Tabelle 24: P80-Umweltfrachten pro Nutzungsjahr für einen Dreisitzer (Cradle-to-Grave), Modellrechnung

Parameter	VOWAled Pisa	VOWAled Palm Beach	HELLER-Leder Blattwerk	HELLER-Leder Onstage! CF	HELLER-Leder Classic	Einheit
Produktionsabfälle, Verpackungsmüll	≥ 2,6	5,3	5,9	0,8	2,2	kg·a ⁻¹
überwachungspflichtige Abfälle	≥ 0,5	0,5	3,7	3,6	4,8	kg·a ⁻¹
Abwasserfracht (CSB)	≥ 0,05	1,2	0,2	0,07	0,04	kg·a ⁻¹
Emissionen (VOC-Fracht)	≥ 0,02	0,01	« 0,001	0,002	0,002	kg·a ⁻¹
Emissionen (SO ₂ -Äq)	≥ 0,02	0,02	0,01	0,05	0,05	kg·a ⁻¹
Emissionen (CO ₂ -Äq)	≥ 8,3	18,5	36,3	34,8	33,7	kg·a ⁻¹

Die kumulierte Nutzungsdauer $t_{N\Sigma}$ gestattet die Umrechnung von **[Umweltwirkung·100·m⁻² Material]** (Cradle-to-Gate-Analyse) auf **[Umweltwirkung·a⁻¹ Nutzungsdauer]** (Cradle-to-Grave-Analyse) als neue funktionale Einheit. In die Cradle-to-Grave-Analyse wurden außerdem der Verschnitt als Produktionsabfall und die Umweltwirkungen der thermischen Entsorgung des Sitzmöbels als Sperrmüll aufgenommen. Dazu zählten die Menge an Asche und Wäscherrückständen aus der Abluftreinigung in der Müllverbrennung sowie die auftretenden Emissionen an Treibhausgasen. Bei der Berechnung der CO₂-Äquivalente wurde der Anteil nachwachsender Rohstoffe für jedes Produkt berücksichtigt. Da das zu entsorgende Gut über einen ausreichenden Heizwert verfügt, wurden keine Energieverbräuche für eine Stützfeuerung in die Bilanz aufgenommen. Unberücksichtigt blieben auch der Einsatz von Energie und Hilfsstoffen für die Abgasreinigung (Kalkstein, Aktivkohle). Alle Berechnungen zum Vergleich der Produkte fasst Anlage 15 zusammen.

Die aufgeführten Berechnungen stellen reine Modellbetrachtungen dar. Sie veranschaulichen aber den starken Einfluss von Design, Verarbeitung und Nutzungsdauer und nicht zuletzt die enorme Hebelwirkung des Konsumentenverhaltens auf die Gesamtökobilanz. In die Modellrechnungen konnte leider keines der Trends Substitute aufgenommen werden, da z. Z. keine gesicherten Erfahrungen zu der zu erwartenden mittleren Nutzungsdauer als Möbelbezugsmaterial vorliegen.

Die Generalvollversammlung der Vereinten Nationen formulierte am 25. September 2015 unter dem Titel "Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung" 17 Ziele. "Sustainable Development Goal n° 12" (SDG) fordert eine nachhaltige Konsumtion und Produktion. Angestrebt wird ein umweltverträglicher Umgang mit Chemikalien und allen Abfällen während ihres gesamten Lebenszyklus in Übereinstimmung mit den vereinbarten internationalen Rahmenregelungen. Die Freisetzung gefährlicher Stoffe in Luft, Wasser und Boden soll sich verringern und nachteilige Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt auf ein Mindestmaß beschränkt bleiben. Auf diesem Weg sind einheitliche und transparente ökologischen Bewertungen von Produkten von Nutzen. Sie bedürfen normierter **Produktkategorieregeln (PCR)**. Erst das Gesamtmosaik aus vielen Quellen liefert Informationen für den gesamten ökologischen Fußabdruck. Produktbezogenes Umweltmanagement ist wichtig, da in den Augen des Konsumenten bevorzugt die von ihnen genutzten Produkte als Träger und Verursacher von Umweltbelastungen angesehen werden.

Gegenwärtig existiert für die im Vorhaben betrachteten Werkstoffe nur für die Berechnung des CO₂-Fußabdrucks (CFP) von Leder eine europäische Norm unter DIN EN 16887:2017. Als Leder werden hier Halbfabrikate (Wet-Ware) und Fertigleder für die Verarbeitung zu Konsumgütern nach EN 15987 subsummiert. Eine Differenzierung hinsichtlich der Lederart (z. B. Polsterleder, Oberleder, Täschnerleder etc.) oder eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Erzeugnissen eines Unternehmens erfolgt nicht. Die vergleichende Ökobilanz des Vorhabens basiert in Summe auf 13 Schritten:

- (1) Definition des zu untersuchenden Produktsystems
- (2) Festlegung eines Produktsystems als Vergleichsstandard
- (3) Überprüfung der Gebrauchseigenschaften
- (4) Überprüfung der Produktivität und Ressourcenmächtigkeit
- (5) Überprüfung der mittleren Nutzungsdauer
- (6) Festlegung der funktionalen Einheit
- (7) Definition der Systemgrenzen (Kernprozess, Vorketten, Nutzerphase)
- (8) Ranking aller Rohstoffe und Hilfsmittel des Kernprozesses
- (9) Sachbilanz unter Anwendung der P80-Akkumulation
- (10) Sachbilanz Dosis-Risiko-Analyse aller übrigen Hilfsmittel
- (11) Bilanzierung der Umweltwirkungen (Cradle-to-Gate)
- (12) Bilanzierung der Umweltwirkungen (Cradle-to-Grave)
- (13) Bewertung und Vergleich der Produktsysteme

Die Ergebnisse des durchgeführten Vorhabens sollen Unternehmen, welche bemüht sind, sozial wie ökologisch transparent und fair zu agieren, in ihren Anstrengungen unterstützen. Greenwashing, Verbrauchertäuschung durch unlauteres Social Media und Influencer Marketing soll entgegentreten werden. Das Projekt zeigt Perspektiven für eine objektive ökologische Beurteilung von neu am Markt erscheinenden Produkten auf. Die vorgestellte Methode versteht sich als Werkzeug für die Branchen der leder- und kunstlederherstellenden und -verarbeitenden Industrien und für den Handel. Zusammengefasst stehen folgende Effekte im Focus:

- Strategische Hilfe für Unternehmen zu Fragen der Nachhaltigkeit
- Benchmarks zu ökologischen Fußabdrücken (Wasser, Energie, Klima)
- Entscheidungshilfen in Beschaffungsfragen (Rohstoffe, Hilfsmittel)
- Arbeitsmittel für Umwelterklärungen, Zertifizierungen, Umweltaudits
- Transparenz von Zertifizierungsprozessen für Außenstehende
- Unabhängige Produktinformationen für Verbraucher und Handel
- Weiter- und Neuentwicklung von Prozess- und Produktaudits
- Anleitung zur periodischen Erfassung umweltrelevanter Daten
- Aufdeckung von Ökodumping und Greenwashing

6 Öffentlichkeitsarbeit, Wissenstransfer und Critical Review

Die Berichtslegung zum Vorhaben erfolgte durch die federführende Forschungseinrichtung und Zuarbeiten der Kooperationspartner. Bereits während der Laufzeit des Vorhabens wurden Treffen zur Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse durchgeführt. Dabei wurden interessierten Kreise einbezogen. Tabelle 25 bietet eine Übersicht der nach Abschluss des Vorhabens geplanten Maßnahmen, einzubeziehende Organisationen und Veranstaltungen, welche der Verbreitung der Projektergebnisse dienen:

Tabelle 25: Transfer-Wege des Vorhabens

Gremien, Medien	Organisationen	Veranstaltungen
Critical Review durch einen unabhängigen Gutachter und vor interessierten Kreisen	Verband der Deutschen Lederindustrie e. V. (VDL)	Freiberger Ledertage
Fachbeirat Kunststoffbahnen	Forschungsgemeinschaft Leder e.V. (FGL)	Freiberger Polymertag
Fachbeirat Leder Biopolymere	ECO ₂ L-Zertifizierung (Energy Controlled Leather)	Tech-Textil Frankfurt
Internetauftritt	OEKO-TEX®-Zertifizierung	MTEX Chemnitz
Fachpresse	Verein zur Förderung des FILK e.V.	IHK-geprüfte Zusatzqualifikation an der SBG Dresden
Jahresbericht FILK	Verband der Nordostdeutschen Textil und Bekleidungsindustrie e.V.	Symposium Technische Textilien der Westsächsischen Hochschule Zwickau

Während des Vorhabens wurden am 05.06.2020 ein Kick-off-Meeting und am 03.05.2022 eine Präsentation von Zwischenergebnissen mit dem Projektträger, Industrievertretern und dem Verband der Deutschen Lederindustrie e. V. durchgeführt. Weitere Kontakte mit Industrie, Handel und Medienvertretern konnten auf Grund der Corona-Lage nur elektronisch erfolgen.

Das Projekt wurde am 9. November 2022 mit der Durchführung einer kritischen Prüfung gemäß DIN EN ISO 14040/44 abgeschlossen. Das Protokoll des Critical Review ist Bestandteil des Projektberichts.

7 Danksagung

Das Forschungsvorhaben "Vergleichende Ökobilanz von Leder, Kunstleder und Trendsustituten" – Akz. 35268/01-21, wurde anteilig von der Bundesstiftung Umwelt gefördert. Wir bedanken uns für die gewährte Unterstützung.

Der weitere Dank gilt den Kooperationspartnern Vowalon Beschichtung GmbH und der HELLER-Leder GmbH & Co. KG sowie den beteiligten Mitarbeitern der FILK Freiberg Institute gGmbH und weiteren Partnern und interessierten Kreise für die fachkritische Begleitung.

Ein besonderer Dank gilt weiterhin den Unternehmen Nuvi Releaf GmbH Frankfurt/ Main und Völpker Spezialprodukte GmbH für die Aufgeschlossenheit gegenüber dem Thema, die unentgeltliche Bereitstellung von Prüfmustern und die Beantwortung von Fragen.

8 Kritische Prüfung

PROTOKOLL

Critical Review nach DIN EN ISO 14040/ 14044

Auftraggeber: FILK Freiberg Institute GmbH
Ort: Freiberg
Datum: 09.11.2022 10:00 Uhr - 16:00 Uhr

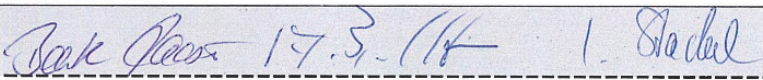
	Kommission	Qualifikation/ Sachgebiet
Vorsitzende	Dr. sc. nat. Beate Haaser	selbständig, Unternehmensberatung für Umweltmanagement (UMA), Qualitätsmanagement (QMA), Nachhaltigkeit, erneuerbare Energien, Abfallverwertung, QM-Auditor, Umweltauditor
Sachverständiger	Dipl.-Ing. Frank Bruchholz	FILK Freiberg Institute GmbH, QM-Beauftragter
Sachverständige	Dr. rer. nat. Ines Stachel	FILK Freiberg Institute GmbH, Leiterin AG Chemische Analytik/ Öko-Tex®

Die personelle Zusammenstellung der Kommission erfolgte durch die Vorsitzende in ihrer Eigenschaft als externe und unabhängige Sachverständige.

Ausschuss interessierter Kreise - Liste der Teilnehmer	
Prof. Dr. Haiko Schulz	Geschäftsführer, FILK Freiberg Institute GmbH
Prof. Dr. Michael Meyer	Geschäftsführer, FILK Freiberg Institute GmbH
Dr. Anke Mondschein	Abteilungsleiterin, FILK Freiberg Institute GmbH
Mareen Götz	Geschäftsführerin, Vowalon GmbH
Ekkehard Werner	Umwelt-, Energie-, Nachhaltigkeits- & Arbeitssicherheitsmanagement, Heller-Leder GmbH & Co. KG
Andreas Meyer	Geschäftsführer, Verband der deutschen Lederindustrie (VDL)

P R O T O K O L L

Critical Review nach DIN EN ISO 14040/ 14044

Titel der Ökobilanz: "Vergleichende Ökobilanz von Leder, Kunstleder und Trendsustituten"		
Autor:	Dr.-Ing. Bernhard Trommer	Promotion (TU Bergakademie Freiberg), Dipl.-Ing. für Ledertechnologie (TU Chemnitz), Fachingenieur für Luftreinhaltung (THC Leuna-Merse-burg), Umweltbetriebsprüfer (UBP-TÜV Süd)
Beteiligte Institutionen:		
Federführende Einrichtung		FILK Freiberg Institute GmbH
Kooperationspartner		Vowalon Beschichtung GmbH
Kooperationspartner		Heller-Leder GmbH & Co. KG
	Deutsche Bundesstiftung Hannover	Fördermittelgeber
Prüfkomplexe	normkonform nicht konform	Anmerkungen
Übereinstimmung der angewandten Methode mit dem Standard	X	Die Methodik bei der Erstellung der LC-Analyse entspricht vollumfänglich den Vorgaben der DIN 14040 bzw. DIN 14044.
Wissenschaftlichkeit und technische Gültigkeit in der Vorgehensweise	X	Die LC-Analyse wurde mit der gebotenen wissenschaftlichen Sorgfalt durchgeführt und ist technisch formal gültig.
Zweckmäßigkeit und Zielgebundenheit der verwendeten Daten	X	Die umfangreiche Datenbasis wurde konform den Vorgaben der DIN 14040 konzentriert und verwendet. Teilweise sind die Daten bedingt durch die zur Verfügung stehende Literatur älteren Ursprungs.
Transparenz und Zweckmäßigkeit der Auswertung	X	Die Datenaufbereitung ist übersichtlich, transparent und zielführend.
Darstellung zielbezogener Einschränkungen in der Auswertung	X	Die Darstellung der Annahmen und Einschränkungen, die für die Erstellung der LCA verwendet wurden, entspricht den formalen Vorgaben. Die Näherung über die Pareto-Analyse ist bisher kein Standard für die Erstellung von LCA. Die Erläuterungen dazu im Bericht sollten daher noch klarer dargestellt werden, ggf. mit der Abschätzung der daraus resultierenden Fehler.
Angemessenheit der Geheimhaltung gegenüber Projektpartnern	X	Die Zusammenarbeit der Projektpartner war transparent und offen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die zukünftige angemessene Geheimhaltung gegenüber Dritten.
Kompatibilität der Berichterstattung mit den Bedürfnissen der Adressaten	X	Der Schlussbericht kann von den Adressaten in neutraler Art verwendet werden. Er kann als den Bedürfnissen entsprechend bewertet werden. Eine Konzentration auf die für das Projekt notwendigen Themen wird empfohlen.
Datum:	21. November 2022	
Unterschriften:		

Der vollständige Bericht zum Protokoll ist Bestandteil der Anlage 17 zum Vorhaben

9 Literaturverzeichnis

- /1/ Bauer M.: Leather, WWF and deforestation.- In: International Leather Maker 35 (2022), 5/6 S. 20 - 22
- /2/ Bidegain J.-P.: Les Amériques rejettent le véganisme!- In: Industrie du Cuir 70 (2018) 1/ 2, S. 3
- /3/ Bidegain J.-P.: The millennials' report with luxury.-In: Industrie du Cuir 70 (2018) 1/ 2, S. 34f
- /4/ Bidegain J.-P.: "FlyLeather": NIKE's new footwear line would contravene labelling legislation.- In: Industrie du Cuir 70 (2018) 4-6, S. 44f
- /5/ von Carlowitz H. C.: Sylvicultura oeconomica oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht.- Freiberg, 1713
- /6/ Carus M. et. al.: Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaser-Werkstoffen (Deutschland und EU).- In: Gülzower Fachgespräche 26, Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. Gülzow, 2008
- /7/ Ciroth A.: Fehlerrechnung in Ökobilanzen.- Dissertation, TU Berlin, 2001
- /8/ Engelhardt A.: Die Welt der Fasern 2018.- In: Textil Plus 2018, Ausgabe 07/08, S. 10 – 13
- /9/ Gnauck C.: Herausforderungen ökologisch-ökonomischer Leistungsmessung – Literaturanalyse und Praxistest im Bereich Holz- und Brückenbau.- In: Dresdner Beiträge zur Lehre der betrieblichen Umweltökonomie Nr. 39/2010, TU Dresden, 2011, <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-38075>, Stand: 01.07.2020
- /10/ Hauber Chr.: Referenzdokument über die Besten Verfügbaren Techniken für die Lederindustrie mit ausgewählten Kapiteln in deutscher Übersetzung.- In: Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU), Hrsg. Umweltbundesamt, Dessau, Februar 2003
- /11/ Kozlowski M. et. al.: Einfach ins Blaue oder methodisch ins Grüne?- In: Konstruktionspraxis spezial (2018) 10, S. 24f
- /12/ Kupec J. et. al.: On the Syntan inhibition of the activation process as judged by aminopeptidase activity changes.- Vortrag auf dem VII. Congress on the Leather Industry, 04. – 10. Oktober 1982 in Budapest
- /13/ Langlade A.; A. Pflug: Xenius: Leder aus Pflanzen - Was taugen Ananas, Kork & Co?- https://programm.ard.de/TV/arte/xenius--leder-aus-pflanzen/eid_28724639865269 Stand: 06.03.2019
- /14/ Lohre D.; S. Herschlein: Grüne Logistik - Studie zu Begriffsverständnis, Bedeutung und Verbreitung „Grüner Logistik“ in der Speditions- und Logistikbranche.- Institut für Nachhaltigkeit in Verkehr und Logistik (INVL) an der Hochschule Heilbronn, 2010
- /15/ Meier M. et. al.: Nachhaltigkeitsbeurteilung von Schweizer Rindfleischproduktionssystemen verschiedener Intensität.- Forschungsbericht, FiBL Schweiz, Frick, 2014
- /16/ Meyer M. et. al.: Comparison of the technical performance of leather, artificial leather and trendy alternatives.- In: Coating (2021) 11, p. 226
- /17/ Mitchell P. J. et. al.: Agricultural By-product Suitability for the Production of Chitinous Composites and Nanofibers.- In: Process Chemistry 80 (2019) 5, S. 95 -102
- /18/ Reich G.: Vom Kollagen zum Leder.- Hrsg. Forschungsgemeinschaft Leder e. V. und Verein für Gerberei-Chemie und Technik e. V., Freiberg, 2003

- /19/ Taylor Y.: A leather-free future for interiors?- In: Automotive Interiors World (2018), Ausgabe Mai, S. 6
- /20/ Trommer B.; H.-J. Kellert: Vergleich der verschiedenen Gerbarten auf ihre ökologische Gesamtwirkung.- Forschungsbericht, IGF-Vorhaben Nr. 10613 B, Freiberg 1998
- /21/ Trommer B.: Kollagen als technische Werkstoffressource im Vergleich mit anderen Biopolymeren.- Vortrag auf dem 2. Freiburger Kollagensymposium vom 25. – 26. Mai 2000 in Freiberg
- /22/ Trommer B.; R. Lungwitz; B. Naujoks: Kaschieren druckempfindlicher und thermisch sensibler Flächenwerkstoffe unter Erhalt ihrer besonderen Gebrauchseigenschaften (SOFTTACK).- Forschungsbericht, IGF-Vorhaben Nr. 439 ZGB, Freiberg, 2014
- /23/ Trommer B.: Leder im Automobil – Richtige Bewertung eines nachwachsenden Naturrohstoffs.- Vortrag auf der 5. VDI-Fachkonferenz: Leder im Automobilen Cockpit, 21. – 22. Oktober 2014 in Mannheim
- /24/ Trommer B.: Ökolabel, Managementsysteme, Zertifikate und Audits.- Vortrag anlässlich des FILK-Seminars "Leder kompakt" am 14. und 15. November 2017 in Freiberg
- /25/ unbekannt: Der stationäre Handel erholt sich - Die neue Liebe zum Offline-Einkauf.- In Managermagazin vom 06. Oktober 2018, <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/handel/einzelhandel-stationaerer-handel-erholt-sich-a-1231890.html>, Stand 08.10.2018
- /26/ unbekannt: Global meat-eating is on the rise, bringing surprising benefits.- In: <https://www.economist.com/international/2019/05/04/global-meat-eating-is-on-the-rise-bringing-surprising-benefits>, Stand: Economist vom 02. Mai 2019
- /27/ unbekannt: Kering measures its environmental impact of leather.- In: International Leather Maker ILM 4 (2016) 2, S. 38-40
- /28/ unbekannt: Ist tatsächlich "Bio" drin, wo "Bio" draufsteht?- In: Fachzeitschrift für Textilveredelung und Promotion, 2021, Ausgabe 5, S. 63
- /29/ Widok A. H.: Einsatzmöglichkeiten von Simulationssoftware zur Bewertung und Entscheidungsunterstützung von betrieblichem Prozessrefactoring im Hinblick auf den Nachhaltigkeitsgedanken.- Dissertation, Universität Hamburg, 2016
- /30/ Wimmer R. et. al.: Grundlagenforschung für die Entwicklung von Produktprototypen aus Naturstoff-gebundenen Vliesen.- In: Berichte aus Energie- und Umweltforschung, Bericht Nr. 35, Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2007

10 Tabellensverzeichnis

<i>Tabelle 1: Arbeitspakete des Vorhabens</i>	11
<i>Tabelle 2: P80-Akkumulation Kernprozess PVC-Kunstleder VOWAled Pisa</i>	19
<i>Tabelle 3: P80-Akkumulation Kernprozess PVC-Kunstleder VOWAled Palm Beach</i>	19
<i>Tabelle 4: P80-Akkumulation Kernprozess HELLER-Leder Blattwerk</i>	20
<i>Tabelle 5: P80-Akkumulation Kernprozess HELLER-Leder Onstage! CF</i>	20
<i>Tabelle 6: P80-Akkumulation Kernprozess HELLER-Leder Classic</i>	20
<i>Tabelle 7: P80-Werte für den Ressourcenverbrauch (Cradle-to-Gate)</i>	21
<i>Tabelle 8: Spezifischer Energieverbrauch der Kernprozesse</i>	22
<i>Tabelle 9: P80-Werte für den spezifischen Energieverbrauch Cradle-to-Gate</i>	22
<i>Tabelle 10: Input-/ Output-Bilanz mit den gewählten Umweltaspekten</i>	23
<i>Tabelle 11: P80-Werte ausgewählter Umweltwirkungen (Cradle-to-Gate)</i>	23
<i>Tabelle 12: P80-Werte des Carbon Footprint Kernprozesse und Cradle-to-Gate</i>	28
<i>Tabelle 13: P80-Akkumulation Kernprozess Trendsstitut Piñatex</i>	29
<i>Tabelle 14: P80-Akkumulation Kernprozess Trendsstitute aus Pilzmyzel</i>	29
<i>Tabelle 15: P80-Werte für den Ressourcenverbrauch für zwei Trendsstitute</i>	29
<i>Tabelle 16: Spezifischer Energieverbrauch (Kernprozesse, Trendsstitute)</i>	30
<i>Tabelle 17: P80-Werte für den spezifischen Energieverbrauch (Cradle-to-Gate, Trendsstitute)</i>	30
<i>Tabelle 18: P80-Werte des Carbon Footprint Kernprozesse und Cradle-to-Gate</i>	30
<i>Tabelle 19: Prüfkannan für die vergleichende Ökobilanz von Möbelbezugsmaterialien</i>	31
<i>Tabelle 20: Ergebnis der Werkstoffprüfungen nach Rangzahlen</i>	32
<i>Tabelle 21: Testergebnisse für aufbereitete Myzelmatte nach WO2020/102552A1 (Treatment A)</i>	50
<i>Tabelle 22: Modellannahmen Cradle-to-Grave-Analyse für einen Dreisitzer</i>	58
<i>Tabelle 23: P80-Ressourcenverbrauch pro Nutzungsjahr für einen Dreisitzer (Cradle-to-Grave), Modellrechnung</i>	59
<i>Tabelle 24: P80-Umweltfrachten pro Nutzungsjahr für einen Dreisitzer (Cradle-to-Grave), Modellrechnung</i>	59
<i>Tabelle 25: Transfer-Wege des Vorhabens</i>	63

11 **Abbildungsverzeichnis**

<i>Abbildung 1: Beispiele für trendige Ökoprodukte:</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 2: Systemgrenzen Ökobilanz PVC-Kunstleder (Bildquelle Mischerei und Stahlbandbeschichtungsanlage aus Wissenspeicher Leder, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1979)</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 3: Systemgrenzen Ökobilanz Rindleder</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 4: Dosis-Risiko-Analyse aufgeschlüsselt nach den untersuchten Produkten.....</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 5: Darstellung der Dosis-Risiko-Analyse für Substanzen aus dem ersten Quadranten</i>	<i>25</i>
<i>Abbildung 6: Nuvi Releaf nach Alterungssimulation in Klimakammer.....</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 7: Zusammenhang von Bevölkerungsentwicklung und Viehwirtschaft</i>	<i>34</i>
<i>Abbildung 8: Vollmechanisierte Entfleisch- und Spaltlinie für Großviehhäute im Wasserwerkstattbereich der Gerberei (Quelle: HELLER-Leder GmbH & Co. KG).....</i>	<i>36</i>
<i>Abbildung 9: Montanwachse und Basochromgerbstoff als Kuppelprodukt (Bildquelle: Völpker Spezialprodukte GmbH).....</i>	<i>38</i>
<i>Abbildung 10: Gewinnung von Chrom-(III)-sulfat als Kuppelprodukt der Montanwachsproduktion (Quelle: Völpker Spezialprodukte GmbH).....</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 11: Absorptionskältemaschine (Quelle: Vowalon Beschichtung GmbH).....</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 12: Kühlwalzen mit laufender Warenbahn (Quelle: Vowalon Beschichtung GmbH)</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 13: Beschichtungsanlage mit Warenspeicher im Vordergrund (Quelle: Vowalon Beschichtung GmbH)</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 14: Halbtechnische Versuche zu PVC-Streichverfahren am FILK Freiberg Institute gGmbH (Quelle: B. Trommer, Freiberg).....</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 15: Querschnitt Nuvi Releaf (Lichtmikroskop).....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 16: Querschnitt Piñatex (Lichtmikroskop)</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 17: Produktquerschnitt Muskin (REM, 50-fach).....</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 18: Myzelstränge Produkt MuSkin (REM, 2.000-fach)</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 19: Ausschnitt aus der Sylvicultura Oeconomica</i>	<i>52</i>

12 Verzeichnis der Anlagen⁵⁰

- (1) Sachbilanz nach ISO 14040 – Methodische Vorgehensweise
- (2) Datenerhebungsblätter nach ISO 14044 – Rindleder Typ Blattwerk Kernprozess
- (3) Datenerhebungsblätter nach ISO 14044 – Rindleder Typ Blattwerk mit Vorketten
- (4) Datenerhebungsblätter nach ISO 14044 – Rindleder Typ On Stage! CF Kernprozess
- (5) Datenerhebungsblätter nach ISO 14044 – Rindleder Typ On Stage! CF mit Vorketten
- (6) Datenerhebungsblätter nach ISO 14044 – Rindleder Typ Classic Kernprozess
- (7) Datenerhebungsblätter nach ISO 14044 – Rindleder Typ Classic mit Vorketten
- (8) Datenerhebungsblätter nach ISO 14044 – PVC-Kunstleder Typ VOWAled Pisa Kernprozess + Vorketten
- (9) Datenerhebungsblätter nach ISO 14044 – PVC-Kunstleder Typ VOWAled Palm Beach Kernprozess + Vorketten
- (10) Datenerhebungsblätter nach ISO 14044 – Alternatives Trendprodukt Piñatex Kernprozess + Vorketten
- (11) Datenerhebungsblätter nach ISO 14044 – Ledersubstitut Typ Pilzmyzel (in Anlehnung an Mylo u. ä. Produktsysteme) mit Vorketten
- (12) Ergebnisse zum Prüfprogramm der Versuchsmuster
- (13) Technologische Informationen zur Montanwachsbleiche der Völpker Spezialprodukte GmbH
- (14) Sensitivitätsanalyse ausgewählter Parameter
- (15) Modellrechnung zum vollständigen anaeroben Abbau einer bovinen Rohhaut
- (16) Produktvergleich Cradle-to-Grave (5 Produktsysteme)
- (17) Vollständiges Protokoll zur kritischen Prüfung vom 09. November 2022

⁵⁰ Alle gelisteten Anlagen liegen am FILK Freiberg Institute gGmbH vor. Gemäß DIN EN ISO 14040 Kap. 4.3 d) ist die Einsichtnahme nur vor Ort und nur mit ausdrücklicher Zustimmung aller drei Projektpartner erfolgen.