

2025

Product Environmental Footprint (PEF)- Studie für Euro-Banknoten als Zahlungsmittel im Bargeldkreislauf für Deutschland



Im Auftrag:



DEUTSCHE
BUNDESBANK
EUROSYSTEM

Impressum	
Zitiervorschlag	Angelo Stefanel; Niels Jungbluth (2025) Product Environmental Footprint (PEF)-Studie für Euro-Banknoten als Zahlungsmittel im Bargeldkreislauf für Deutschland. ESU-services GmbH im Auftrag von Deutsche Bundesbank, Schaffhausen, Schweiz, https://esu-services.ch/de/publications/subject-matters/
Auftragnehmer	ESU-services GmbH, Vorstadt 10, CH-8200 Schaffhausen Tel. 0041 44 940 61 32 jungbluth@esu-services.ch https://www.esu-services.ch
Auftraggeber	Deutsche Bundesbank, Wilhelm-Epstein-Straße 14, 60431 Frankfurt am Main Fachstelle: Anke Deinzer (Bereich: Nachhaltigkeit im Bargeldkreislauf) https://www.bundesbank.de
Stichwörter	Banknoten
Kurztext	In dieser Studie wird eine Ökobilanz für den Bargeldumlauf in Deutschland erstellt.
Über uns	ESU-services GmbH wurde im Jahre 1998 gegründet. Die Hauptaktivitäten der Firma sind Beratung, Forschung, Review und Ausbildung im Bereich Ökobilanzen. Fairness, Unabhängigkeit und Transparenz sind wesentliche Merkmale unserer Beratungsphilosophie. Wir arbeiten sachbezogen und führen unsere Analysen unvoreingenommen durch. Wir dokumentieren unsere Studien und arbeiten transparent und nachvollziehbar. Wir bieten eine faire und kompetente Beratung an, die es den Auftraggebern ermöglicht, ihre Umweltperformance zu kontrollieren und kontinuierlich zu verbessern. Zu unseren Kunden zählen verschiedene nationale und internationale Firmen, Verbände und Verwaltungen. In einigen Bereichen wie Entwicklung und Betrieb webbasierter Ökobilanz-Datenbanken oder Umweltauswirkungen von Nahrungsmitteln und Konsummustern konnte unser Team Pionierarbeit leisten.
Urheberrecht	Soweit nicht anders vermerkt bzw. direkt vereinbart sind sämtliche Inhalte in diesem Bericht urheberrechtlich geschützt. Das Kopieren oder Verbreiten des Berichts als Ganzes oder in Auszügen, unverändert oder in veränderter Form ist nicht gestattet und Bedarf der ausdrücklichen Zustimmung von ESU-services GmbH oder des Auftraggebers. Der Bericht wird auf der Website https://www.esu-services.ch und/oder derjenigen des Auftraggebers zum Download bereitgestellt. Aus dem Inhalt dieses Berichtes hervorgehende Veröffentlichungen, welche Resultate und Schlussfolgerungen daraus nur teilweise und nicht im Sinne des Gesamtberichtes darstellen, sind nicht erlaubt. Insbesondere dürfen solche Veröffentlichungen diesen Bericht nicht als Quelle angeben oder es darf nicht anderweitig eine Verbindung mit diesem Bericht oder dem Auftragnehmer hergestellt werden können. Für Forderungen außerhalb des oben genannten Rahmens lehnen wir jegliche Verantwortung gegenüber dem Auftraggeber sowie Dritten ab. Es ist nicht gestattet, den Bericht oder Teile davon auf anderen Websites bereitzustellen. In veränderter Form bedarf die Weiterverbreitung der Inhalte der ausdrücklichen Genehmigung durch ESU-services GmbH. Zitate, welche sich auf diesen Bericht oder Aussagen der Autoren beziehen, sollen den Autoren vorgängig zur Verifizierung vorgelegt werden.
Haftungsausschluss	Die Informationen und Schlussfolgerungen in diesem Bericht wurden auf Grundlage von als verlässlich eingeschätzten Quellen erhoben. Die Erstellung erfolgte im Rahmen der vertraglichen Abmachung mit dem Auftraggeber unter Berücksichtigung der Vereinbarung bezüglich eingesetzter Ressourcen. ESU-services GmbH und die Autoren geben keine Garantie bezüglich Eignung, oder Vollständigkeit der im Bericht dargestellten Informationen. ESU-services GmbH und die Autoren lehnen jede rechtliche Haftung für jede Art von direkten, indirekten, zufälligen oder Folge-Schäden oder welche Schäden auch immer, ausdrücklich ab.
Inhaltliche Verantwortung	Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschließlich die Auftragnehmer verantwortlich.
Version	29.10.2025 https://esuserVICES-my.sharepoint.com/personal/jungbluth_esu-services_ch/Documents/ESU-intern/820 LCA Banknoten DE/Bericht/ESU-2025-LCA-Bargeldumlauf-DE-final.docx

Inhalt

INHALT	II
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	V
ZUSAMMENFASSUNG	VII
Ziel der Studie	vii
Sachbilanzdaten	vii
Auswertung	vii
Interpretation	ix
1 EINLEITUNG	1
2 METHODIK ISO 14040-44 (PRODUKTÖKOBILANZEN)	3
3 ZIELDEFINITION UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN	5
3.1 Fragestellung	5
3.2 Funktionelle Einheit	6
3.3 Untergliederung des Lebenszyklus	6
3.4 Geographische Rahmenbedingungen	8
3.5 Zeitliche Rahmenbedingungen	8
3.6 Systemgrenzen	8
3.7 Abschneidekriterien	10
3.8 Allokation bei Entsorgung von Banknoten	11
3.9 Sensitivitätsanalysen	12
3.10 Szenarioanalysen	12
3.11 Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment)	13
3.12 Veröffentlichung	14
3.13 Unsicherheitsanalysen	14
3.14 Kritische Prüfung	14
4 SACHBILANZ (LIFE CYCLE INVENTORY)	14
4.1 Datenerhebung	14
4.2 Hintergrunddatenbank - Environmental Footprint database v3.1 (2023)	15
4.3 Modellierung	16
4.4 Verteilung	17
4.4.1 Transport	17
4.4.2 Stromverbrauch für Geldausgabeautomaten	19
4.4.3 Energie für Bearbeitungstätigkeiten bei der NZB, den WDL und KI	19
4.4.4 Materialien und Materialentsorgung	20
4.5 Nutzung	20
4.6 Entsorgung	22
4.7 Datenqualität	22
5 AUSWERTUNG (ENVIRONMENTAL FOOTPRINT REPORTING)	27
5.1 Überblick	27
5.2 Charakterisierung	28
5.3 Gesamtpunktwert	29

5.4	Liste der wichtigsten Wirkungskategorien und Lebenszyklus-Stufen	33
6	SENSITIVITÄTSANALYSEN	36
6.1	Stromverbrauch für Geldausgabeautomaten	36
6.2	Stromverbrauch für die Bearbeitungstätigkeit in der Verteilungsphase	37
6.3	Stromverbrauch in der Nutzungsphase	38
7	SZENARIOANALYSEN	39
7.1	Energie	40
7.1.1	Stromverbrauch für Geldausgabeautomaten	41
7.1.2	Stromverbrauch für die Bearbeitungstätigkeit in der Verteilungsphase	42
7.1.3	Stromverbrauch in der Nutzungsphase	44
7.2	Transport	46
7.3	Kombination der Szenarien	47
8	INTERPRETATION	48
8.1	Vergleich mit Literaturwerten für den Bargeldumlauf	49
8.2	Referenzwerte Gesamtumweltbelastung zur Einordnung der Ergebnisse	49
8.2.1	Gesamtkonsum	49
8.2.2	Konsumbereiche	50
8.2.3	Einzelne Konsumaktivitäten	50
8.3	Referenzwerte Treibhausgasemissionen zur Einordnung der Ergebnisse	51
8.3.1	Europa	51
8.3.2	Deutschland	51
8.4	Schlussfolgerungen	55
8.5	Empfehlungen der Autoren der Studie	56
9	LITERATUR	58
A.	ANHANG BEWERTUNGSMETHODE PEF - EUROPÄISCHER UMWELTFUßABDRUCK (2018)	62
A.1	Charakterisierungsmodelle	62
A.2	Klimawandel	64
A.3	Ozonabbau	64
A.4	Ionisierende Strahlung	64
A.5	Photochemische Ozonbildung	64
A.6	Feinstaub	64
A.7	Humantoxizität, nicht Krebs	64
A.8	Humantoxizität, Krebs	65
A.9	Versauerung	65
A.10	Eutrophierung bzw. Überdüngung	65
A.10.1	Süßwasser	65
A.10.2	Meer	65
A.10.3	Terrestrisch	65
A.11	Ökotoxizität, Süßwasser	66
A.12	Landnutzung	66
A.13	Wassernutzung	66
A.14	Ressourcennutzung, fossil	66
A.15	Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle	67
A.16	Langzeitemissionen	67
A.17	Normierung und Gewichtung	67

B. CIRCULAR FOOTPRINT FORMULA	67
B.1 Einführung	67
B.2 In dieser Studie verwendete Parameterwerte	69
C. ANHANG BEVÖLKERUNGSZAHL	70
D. GUTACHTEN ÜBER DIE KRITISCHE PRÜFUNG DURCH DR. CONRAD SPINDLER, GEENDELTA, BERLIN	71
E. ANHANG SACHBILANZDATEN IN EXCEL (VERTRAULICH)	72
F. ANHANG ESU-SERVICES GMBH	72
F.1 Unsere Philosophie «fair consulting in sustainability»	72
F.2 Breite Palette von Beratungsdienstleistungen	72
F.2.1 Beratung und Fallstudien zu Lebenszyklusanalysen:	72
F.2.2 Gut dokumentierte Sachbilanzdaten:	73
F.2.3 Prüfung und Verifizierung von Ökobilanz, CO ₂ -Fussabdruck und Umweltdeklaration:	73
F.2.4 LCA Software:	73
F.2.5 Schulungen:	73
F.3 Erfahrenes Projektteam	73
9.1.1 Dr. Niels Jungbluth, Geschäftsführer und Inhaber	74
9.1.2 Angelo Stefanel, Projektleiter	74
F.4 Ökologische und soziale Verantwortung	75
F.5 Gemeinsame Werte in einem weltweiten Netzwerk	75
F.6 Mehr als 25 Jahre Erfahrung	76

Abkürzungsverzeichnis

ATM	Automated Teller Machine → s. GAA
BAD	Banknote Authentication Devices
BDGW	Bundesvereinigung Deutscher Geld- und Wertdienste
CBT	Cross Border Transport
CI	Credit Institute → s. KI
CIT	Cash In Transit (company) → s. WDL
CO ₂ -eq.	CO ₂ -Äquivalente
EAC	Euro Area Citizen
ECB	European Central Bank → s. EZB
EF	Environmental Footprint
ELCD	European Life Cycle Database
EPOS	Electronic Point-of-Sale
EU-Kommission	Europäische Kommission
EZB	Europäische Zentralbank → s. ECB
GAA	Geldausgabeautomat → s. ATM
GWP	Global Warming Potential "
ILCD	International Life Cycle Data
KI	Kreditinstitut → s. CI
kWh	Kilowattstunde
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
Lkw	Lastkraftwagen
NCB	National Central Bank → s. NZB
NHTO	Notes Held To Order
NZB	Nationale Zentralbank → s. NCB
OEFSR	Organisation Environmental Footprint Sector Rules
PEF	Product Environmental Footprint
PEFCR	Product Environmental Footprint Category Rules
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Paper Mill

POS	Point-of-Sale
PW	Printing Work
RFI	Radiative Forcing Index
SCoT	Self-Checkout-Terminal
SPACE	Study on the payment attitudes of consumers in the euro area
V	Version
WDL	Wertdienstleister → s. CIT

Zusammenfassung

Ziel der Studie

Ziel der vorliegenden Studie ist die Berechnung eines Product Environmental Footprint (PEF) für Euro-Banknoten als Zahlungsmittel im deutschen Bargeldkreislauf, mit einem speziellen Fokus auf die Banknoten-Ausgabe. Diese Untersuchung wird auf der Grundlage der PEF-Studie für die zweite Euro-Banknotenserie als Zahlungsmittel im Eurosystem (ECB 2023) durchgeführt und bezieht sich auf die Situation in Deutschland für das Jahr 2019. Es wird die Bewertungsmethode gemäss der Environmental Footprint (EF)-Methode Version 3.1 angewendet. Sie wurde von der Europäischen Kommission entwickelt, um eine einheitliche und transparente Berechnung der Umweltauswirkungen von Produkten zu ermöglichen (ELCD 2023).

Die funktionelle Einheit der Studie ist definiert als „durchschnittliche jährliche Barzahlungen einer Person im Jahr 2019 in Deutschland“. Dies bedeutet, dass die Umweltauswirkungen des Bargeldkreislaufs für Banknoten, basierend auf der durchschnittlichen Nutzung von Banknoten im Jahr 2019 durch Erwachsene in Deutschland, ermittelt werden. Die Untersuchung beschränkt sich auf die Phasen der Banknoten-Ausgabe, Verteilung, Nutzung und Entsorgung der Banknoten. Im Unterschied zur europäischen Studie, wird die Herstellung von Banknoten nicht in die Analyse einbezogen.

Das Ziel der Studie ist es, ein gutes Verständnis für den ökologischen Fußabdruck des deutschen Bargeldkreislaufs zu entwickeln und Reduktionsmöglichkeiten für die Umweltbelastungen zu identifizieren. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, fundierte Entscheidungen über Maßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit des Bargeldkreislaufs zu treffen. Ausserdem wird die Relevanz des Bargeldkreislaufs für die in Deutschland verursachten Umweltbelastungen beleuchtet.

Sachbilanzdaten

Im Rahmen der PEF-Studie für den Bargeldkreislauf in Deutschland wurde eine detaillierte Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI) erstellt, die alle relevanten Inputs und Outputs bezüglich Ressourcennutzung, Energieverbrauch und Emissionen der Banknoten im deutschen System umfasst. Die Datenerhebung für die Sachbilanz erfolgte auf Basis von Umweltdaten, die 2020 für das Jahr 2019 erhoben wurden. Diese Umweltdaten wurden von der Deutschen Bundesbank bereitgestellt und beinhalten Informationen zu den verschiedenen Akteuren im Bargeldkreislauf. Dazu gehören die nationale Zentralbank (NZB), die Wertdienstleister (WDL), die Kreditinstitute (KI) und der Handel.

Die Sachbilanz erfasst die Umweltauswirkungen aller relevanten Prozesse und Aktivitäten im Lebenszyklus des Banknotenkreislaufs, die in der Studie berücksichtigt wurden. Dazu gehören der Transport von Banknoten, der Energieverbrauch für die Bearbeitung und Echtheitsprüfung der Banknoten, die Verteilung von Banknoten über Geldausgabeautomaten (GAA), sowie der Verbrauch von Ressourcen und Materialien während der Verteilungs- und Nutzungsphase, einschliesslich der Entsorgung. Ein wesentlicher Bestandteil der Modellierung war die Zuordnung der Umweltdaten zu den entsprechenden Lebenszyklusphasen und Prozessen. Als Hintergrunddatenbank werden Datensätze aus der europäischen EF-Datenbank 3.1 (ELCD 2023) der Europäischen Kommission verwendet.

Für die Modellierung der Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI) wird die Software SimaPro 10.2 verwendet, eine bewährte Lizenzsoftware, die es ermöglicht, detaillierte Analysen der Umweltauswirkungen entlang des Lebenszyklus von Produkten und Dienstleistungen vorzunehmen (SimaPro 2025).

Auswertung

Die Ergebnisse der PEF-Studie zur Umweltauswirkung des Bargeldkreislaufs in Deutschland ergeben, dass die Gesamtumweltbelastung für die funktionelle Einheit, die „durchschnittlichen jährlichen

Barzahlungen einer Person im Jahr 2019 in Deutschland“, 80 μ Pt (gemessen in „Environmental Footprint“-Einheiten) beträgt.

Der Transport von Banknoten spielt eine wesentliche Rolle in der Gesamtumweltbilanz, da es sowohl nationale als auch grenzüberschreitende Transporte gibt, welche oft aus Sicherheitsgründen noch zusätzlich durch Begleitfahrzeuge geschützt werden müssen. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Bedeutung von Effizienzsteigerungen und die potenzielle Rolle umweltfreundlicherer Transportmethoden, insbesondere durch den Einsatz von sparsamen, emissionsärmeren Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen, dort wo es sinnvoll und möglich ist.

Aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen für den Banknotentransport müssen jedoch bis auf weiteres die herkömmlichen Spezialfahrzeuge eingesetzt werden, für die es aktuell keine adäquaten umweltfreundlichen Alternativen gibt. Mit voranschreitenden technischen Innovationen könnte der Banknotentransport künftig ökologisch nachhaltiger ausgerichtet werden, um den Treibhausgas-Ausstoß zu minimieren.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Energieverbrauch der Geldausgabeautomaten (GAA), die für die Bereitstellung von Bargeld an die Verbraucher notwendig sind. Diese Automaten verursachen durch ihren Strombedarf Umweltbelastungen. Besonders der Verbrauch von Strom aus nicht erneuerbaren Quellen stellt relevante Belastungen dar, die durch den Einsatz eines grüneren Strommixes gemindert werden könnte. Die Anteile der verschiedenen Aktivitäten an der Gesamtumweltbelastung werden in Fig. 0.1 gezeigt.

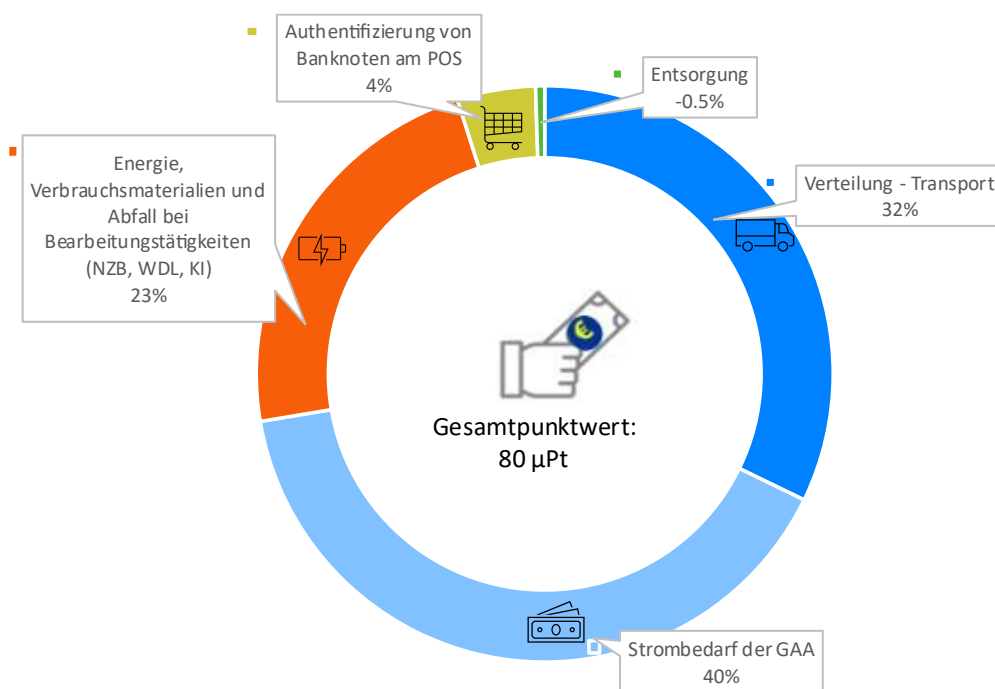


Fig. 0.1 Gesamtumweltbelastung, unterteilt nach Aktivitäten und deren prozentualen Beiträgen.

Die Wirkungskategorie Klimawandel ist hinsichtlich der Bewertung der Gesamtumweltbelastungen am wichtigsten. Relevant sind hier die Emissionen von Kohlendioxid bei Transport und Energieverbrauch. Feinstaubemissionen und Versauerung wurden als weitere wichtige Wirkungskategorien identifiziert, wobei der Transport und die Nutzung fossiler Brennstoffe im gesamten System des Bargeldumlaufs für die verursachenden Emissionen verantwortlich sind.

Diese Belastungen lassen sich durch die Einführung umweltfreundlicherer Technologien in den Bereichen Transport und Energieversorgung reduzieren. Eine Umstellung auf einen erneuerbaren

Strommix sowie die Verwendung von emissionsfreien Transportmethoden könnte die Klimaauswirkungen verringern und zur Reduktion von Feinstaub- und Versauerungswirkungen beitragen.

Eine Sensitivitätsanalyse, die verschiedene Szenarien zur Veränderung der Annahmen bezüglich des Stromverbrauchs untersucht, zeigt, wie stark dieser die Ergebnisse beeinflusst. Eine Reduktion des Strombedarfs der GAA könnte die Umweltauswirkungen des Bargeldkreislaufs in den Bereichen Klimawandel und Feinstaub signifikant senken.

Die Szenarioanalysen zeigen, dass durch eine ökologische Verbesserung des Strommixes sowie den Einsatz von Elektrofahrzeugen bzw. emissionsärmeren Fahrzeugen für den Banknoten-Transport die Umweltauswirkungen des Bargeldkreislaufs reduziert werden könnten.

Interpretation

In der Interpretation der Ergebnisse der PEF-Studie zum Banknotenumlauf in Deutschland, werden die Ergebnisse im Vergleich zu Literaturwerten und Referenzwerten für Gesamtumweltbelastungen und Treibhausgasemissionen eingeordnet. Dabei werden auch die Auswirkungen des Banknotenumlaufs in Relation zu anderen Konsumbereichen wie z.B. Mobilität und Ernährung betrachtet.

Laut der EZB-PEF-Studie (ECB 2023) beträgt der ökologische Fußabdruck für die durchschnittlichen jährlichen Barzahlungen einer Person in der Eurozone 101 μ Pt. Im Vergleich zur EZB-Studie, die auch die Produktion von Banknoten einbezieht, sind die Werte der aktuellen Studie niedriger, da sie sich nur auf den Banknotenumlauf ohne die Banknotenproduktion konzentriert. Rechnet man die Produktion bei den Ergebnissen der EZB-Studie raus, kommt man auf einen Gesamtpunktwert von ca. 88 μ Pt (ECB 2023). Dieser ist in der gleichen Größenordnung wie das Resultat der vorliegenden Studie. Ein weiterer Vergleich zeigt, dass die CO₂-Emissionen der Barzahlungen im Eurosystem mit 1.43 kg CO₂ pro Jahr und Person (bei 7'176 Euro Barzahlungen im Jahr) einen sehr kleinen Anteil (0.017 %) an den gesamten Treibhausgasemissionen des Endkonsums einer Person in der EU haben (Zebisch 2018).

Die Studie zeigt, dass der Banknotenumlauf einen minimalen Beitrag im Vergleich zur Gesamtumweltbelastung leistet. Die jährliche Umweltbelastung durch den Banknotenumlauf beträgt nur 80 μ Pt, was 0.0084 % der Gesamtbelastung eines EU-Bürgers ausmacht. In Deutschland liegt dieser Anteil noch niedriger bei etwa 0.0078 %.

Die Studie vergleicht die Treibhausgasemissionen des Banknotenumlaufs mit denen anderer Konsumbereiche wie Mobilität, Ernährung und Energieverbrauch. Die Emissionen von CO₂-Äquivalenten (CO₂-eq.) durch den Banknotenumlauf in Deutschland betragen 1.26 kg CO₂ pro Jahr und Person. Dies stellt nur 0.01 % der jährlichen CO₂-Äquivalente der Treibhausgasemissionen einer Person in Deutschland dar, die bei etwa 12.5 Tonnen CO₂ pro Person und Jahr liegen (ESU-services 2025a; Jungbluth et al. 2020). Dieser Anteil ist also verschwindend klein.

Weiterhin zeigt die Studie Verbesserungspotentiale im Bargeldkreislauf auf, die die Umweltauswirkungen verringern und zu einer nachhaltigeren Zukunft beitragen können. Die größten Umweltauswirkungen entstehen durch den Energieverbrauch der Geldausgabeautomaten und den Transport der Banknoten. Zusammengefasst wird deutlich, dass der ökologische Fußabdruck des Banknotenumlaufs relativ gering ist, insbesondere wenn man ihn im Kontext von anderen Konsumaktivitäten betrachtet.

1 Einleitung

Die Europäische Zentralbank (EZB) hat zusammen mit den nationalen Zentralbanken (NZBen) im Eurosystem, zu denen auch die Deutsche Bundesbank und alle anderen Euro-Zentralbanken gehören, eine [Product Environmental Footprint \(PEF\)-Studie für die zweite Euro-Banknotenserie als Zahlungsmittel im Eurosystem](#) (nachfolgend: EZB-PEF-Studie) erstellt. Das Eurosystem-Projekt startete zu Beginn des Jahres 2020 und mündete in die Veröffentlichung der [PEF-Studie auf der EZB-Website](#) im Dezember 2023 (ECB 2023). Die Studien-Ergebnisse wurden für die allgemeine Öffentlichkeit aufbereitet und basieren auf einem nicht veröffentlichten, extern geprüften EZB-PEF-Bericht.

Die EZB-PEF-Forschungsarbeit ist eingebettet in die **Eurosystem-/ EZB-Bargeldstrategie 2030** mit dem Ziel den ökologischen Fußabdruck von Euro-Banknoten zu reduzieren und Banknoten so nachhaltig und umweltschonend wie möglich zu gestalten. Gleichzeitig soll Bargeld weit verbreitet, öffentlich zugänglich und sicher bleiben. Das Eurosystem arbeitet schon seit Beginn der Euro-Bargeldeinführung im Jahr 2002 an der ökologischen Nachhaltigkeit für Euro-Banknoten. Im Jahr 2004 hat die EZB eine Ökobilanz für die erste Euro-Banknoten-Serie erstellt, die jedoch nicht wie die aktuelle EZB-PEF-Studie veröffentlicht wurde und für die eine andere Bewertungsmethode verwendet wurde (Braunschweig et al. 2005).

Für die aktuelle EZB-Studie wurde die **PEF-Bewertungsmethode der EU-Kommission** verwendet, da es sich bei Euro-Banknoten um ein «europäisches» Produkt handelt. Die **Ergebnisse** beziehen sich auf **Euro-Banknoten** (nicht auf Euro-Münzen) und das gesamte **Eurosystem**.

Die **Umweltdaten-Erhebung** für die EZB-PEF-Studie erfolgte in allen Euro-Ländern in den Jahren 2020 und 2021 mittels Umwelt-Fragebogen bzw. Befragungen für das Jahr **2019 (Datenbasis)** bei allen Key Stakeholdern des Bargeldkreislaufs. Zu den Stakeholdern gehören Wertdienstleister (WDL), Kreditinstitute (KI), Handel, Banknoten-Hersteller und NZBen.

Die EZB-PEF-Studie bezieht sich auf die **Euro-Banknoten-Produktion** und die **Ausgabe von Euro-Banknoten** bzw. den Bargeldkreislauf für Banknoten. Für das im Eurosystem erstellte PEF-Modell (Euro-Banknoten-Produktion und -Ausgabe) wurde die **LCA-Software SimaPro** als zuverlässig eingestuft und verwendet.

Die **Deutsche Bundesbank** ist Teil des Eurosystems und unabhängige Zentralbank der Bundesrepublik Deutschland. Zu ihren Aufgaben gehört es, jederzeit Euro-Bargeld in hoher Qualität bereitzustellen. Gleichzeitig sieht die Bank gemeinsam mit den heimischen Key Stakeholdern des Bargeldkreislaufs ihre Verantwortung für die ökologische Nachhaltigkeit des Bargeldkreislaufs. Daher wurde **ein PEF-Bericht basierend auf einer PEF-Studie für Euro-Banknoten als Zahlungsmittel in Deutschland mit Fokus auf die Banknoten-Ausgabe (bzw. den Bargeldkreislauf für Banknoten) nach dem Vorbild der EZB-PEF-Studie und den bereits erhobenen deutschen Umweltdaten für das Jahr 2019** in Auftrag gegeben.

In der vorliegenden Studie wird lediglich die deutsche Banknoten-Ausgabe bzw. der deutsche Bargeldkreislauf für Banknoten einbezogen. Die Banknoten-Produktion bleibt außen vor, da es keine deutsche Produktion, sondern nur eine «europäische» Produktion von Euro-Banknoten gibt. Im Ergebnis wird also nur eine Teil-PEF-Studie für die deutsche Banknoten-Ausgabe bzw. den deutschen Bargeldkreislauf für Banknoten (ohne Banknoten-Produktion) erstellt und in einem PEF-Bericht zusammengefasst. Dieser wird von einer unabhängigen externen Stelle geprüft.

Eine Kurzbeschreibung des Projektes inklusive Fragestellungen wird in Tab. 1.1 gezeigt.

Tab. 1.1 Übersicht zum Projekt

Product Environmental Footprint (PEF)-Studie für Euro-Banknoten als Zahlungsmittel im Bargeldkreislauf für Deutschland	
Titel	
Auftraggeber	Deutsche Bundesbank, Wilhelm-Epstein-Straße 14, 60431 Frankfurt am Main https://www.bundesbank.de
Autoren	Angelo Stefanel; Niels Jungbluth, (ESU-services GmbH, Schaffhausen)
Projektteam	Anke Deinzer (Bereich: Nachhaltigkeit im Bargeldkreislauf)
Untersuchte Produkte	Bargeldkreislauf in Deutschland (ohne Herstellung der Banknoten)
Funktionelle Einheit	Durchschnittliche jährliche Barzahlungen einer Person im Jahr 2019 durch Personen über 18 Jahre in Deutschland“ (bezogen auf die Banknoten-Ausgabe bzw. den Bargeldkreislauf).
Fragestellung	Folgende Fragen sollen mit der Studie beantwortet werden: <ul style="list-style-type: none"> • Woher stammen die größten potenziellen Umweltbelastungen im System? • Welche Reduktionsmöglichkeiten gibt es? • Welchen Einfluss haben Annahmen zur Strombereitstellung und andere Kenngrößen?
Bilanzraum	Es wird jeweils der gesamte Bargeldkreislauf für Banknoten betrachtet. Dabei wird deren Herstellung nicht betrachtet.
Referenzjahr	Soweit möglich wurden Sachbilanzdaten für das Jahr 2019 erhoben.
Software	SimaPro 2025 (v.10.2)
Hintergrunddatenbank	ELCD 2023
Umweltbewertung	Die potenziellen Umweltbelastungen werden mit folgenden Indikatoren bewertet: <ul style="list-style-type: none"> • Einzelwirkungskategorien gemäß europäischer Methode für den Umweltfußabdruck (Andreasi Bassi et al. 2023) • Gesamtumweltbelastungen gemäß europäischer Methode für den Umweltfußabdruck (Andreasi Bassi et al. 2023)
Standards	ISO 14040/44 (International Organization for Standardization (ISO) 2006a)
Vergleichende Studie	Nein
Publikation	Ja. Die Studie soll zur Information veröffentlicht werden.
Dokumentation für Prüfung	Vollständiger Schlussbericht (Deutsch) (veröffentlicht ohne vertrauliche Anhänge) SimaPro Modell für kritische Prüfung (vertraulich)
Kritische Prüfung	Kritische Prüfung des vollständigen Berichtsentwurfs durch Dr. Conrad Spindler, GreenDelta, Berlin

Die Studie besteht gemäss Ausschreibung aus vier Phasen (siehe Fig. 1.1). Die folgenden Kapitel beschreiben einzelne Schritte im Detail.

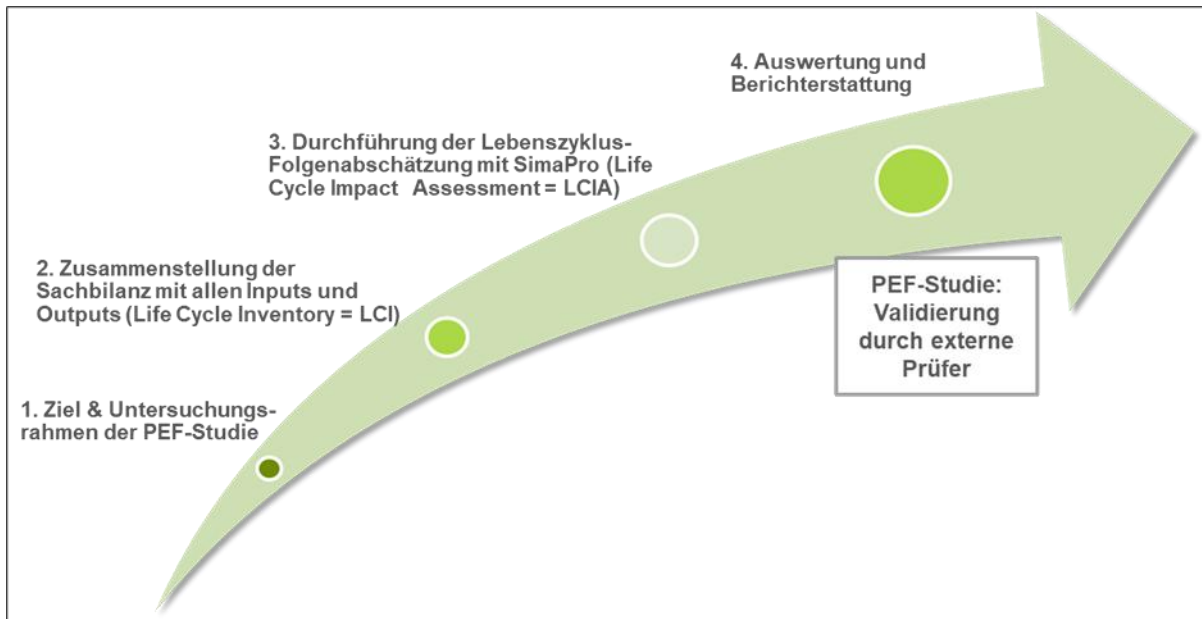


Fig. 1.1 Vier Phasen einer PEF-Studie

2 Methodik ISO 14040-44 (Produktökobilanzen)

Die Ökobilanz bzw. im Englischen das Life Cycle Assessment (LCA) ist eine Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt¹ verbundenen Umweltauswirkungen. Die Ökobilanz beruht auf einem Lebenszyklus-Ansatz. Damit werden die Umweltauswirkungen eines Produktes von der Rohstoffentnahme über Fertigung und Nutzung bis zur Entsorgung des Produktes und der Produktionsabfälle (von der Wiege bis zur Bahre, „cradle to grave“) erfasst und beurteilt.

Eine Ökobilanz lässt sich gemäss ISO 14040 grob in vier Phasen unterteilen (siehe Fig. 2.1):

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
2. Sachbilanz
3. Wirkungsabschätzung
4. Auswertung

¹ Der Begriff Produkt schliesst hier Dienstleistungen mit ein.

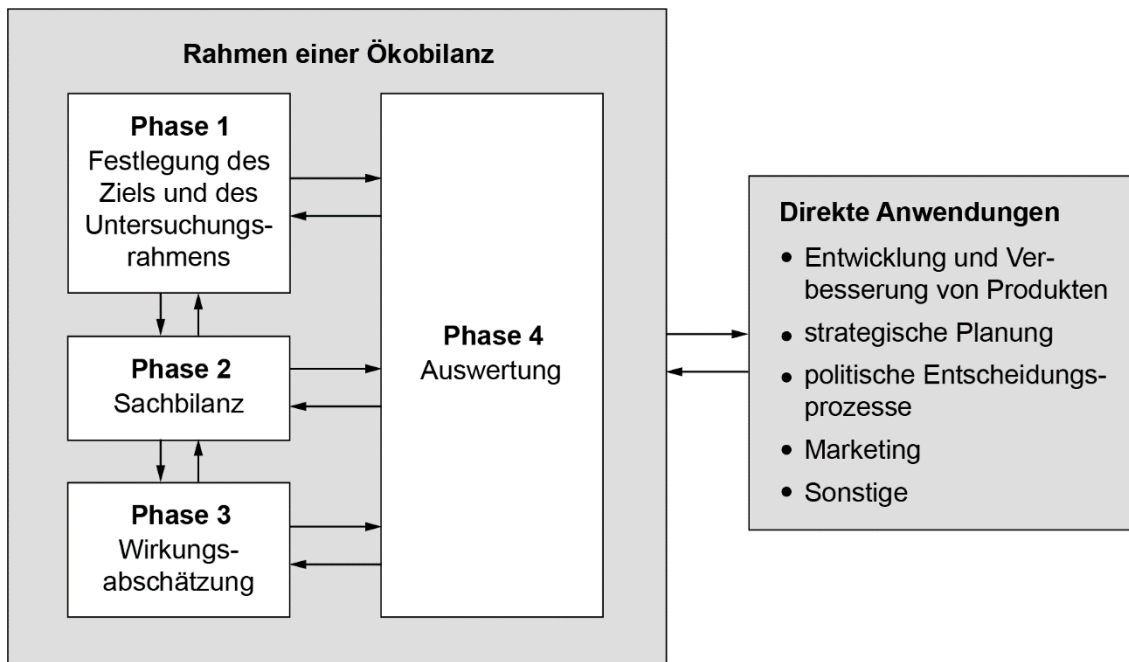


Fig. 2.1 Bestandteile einer Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA); Bezeichnungen in Deutsch (International Organization for Standardization (ISO) 2006b)

Die *Zieldefinition* (Phase 1) enthält die Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes, und die Definition der Bezugsgrösse, der sogenannten funktionellen Einheit. Zudem werden diejenigen Umweltaspekte definiert, die bei Wirkungsabschätzung und der Interpretation berücksichtigt werden sollen. Der *Untersuchungsrahmen* wird abgesteckt, indem die Modellierungsweise und die für ein Produkt massgebenden Prozesse bestimmt und beschrieben werden.

In der *Sachbilanz* (=Ökoinventar, Phase 2) werden die Umwelteinwirkungen durch Ressourcennutzung und Schadstoffemissionen und der Bedarf an Halbfabrikaten, Hilfsstoffen und Energie der am Produktlebenszyklus beteiligten Prozesse erfasst und zusammengestellt. Diese Daten werden in Bezug zum Untersuchungsgegenstand, der funktionellen Einheit gesetzt. Das Ergebnis der Sachbilanz sind die kumulierten Stoff- und Energieflüsse, die durch das Bereitstellen der funktionellen Einheit ausgelöst werden.

Ausgehend von der Sachbilanz wird die *Wirkungsabschätzung* (Phase 3) durchgeführt. Gemäss ISO 14040 wird die Wirkungsabschätzung in verschiedene Teilschritte unterteilt. Die ISO 14044 legt weder spezifische Verfahren fest, noch unterstützt sie die zugrunde liegenden, für die Ordnung der Wirkungskategorien verwendeten Werthaltungen. Die Werthaltungen und Beurteilungen innerhalb der Wirkungsabschätzung liegen in alleiniger Verantwortung des Autors und Auftraggebers der Studie.

Normierung und Gewichtung werden in ISO 14044 als optionale Elemente der LCIA nach der Klassifizierung und Charakterisierung eingeführt. Die Gewichtung darf nicht als alleinige Aussage in Ökobilanzstudien verwendet werden, die für vergleichende Aussagen verwendet werden sollen, die der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden sollen. Die [ISO/TS 14074](https://www.iso.org/standard/62654.html) enthält weitere Leitlinien für die Normierung, Gewichtung und Interpretation (International Organization for Standardization (ISO) 2022). Darin heisst es z.B., dass die Gewichtung auf Wertentscheidungen beruht und nicht wissenschaftlich fundiert ist. Außerdem müssen alle Indikatorergebnisse der Studie vor der Gewichtung in den LCA-Bericht aufgenommen werden.

In der *Auswertung* (Phase 4) werden die Resultate der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung entsprechend dem festgelegten Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz zusammengefasst. Es werden Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen formuliert.

Die ISO-Normen 14040 "Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen" und 14044 "Umweltmanagement – Ökobilanzanforderungen und Anleitungen" (International Organization for Standardization (ISO) 2006b, c) beschreiben die Vorgehensweise bei der Erarbeitung einer Ökobilanz. Die Normen-Texte beschränken sich in der Regel auf Zielvorgaben und überlassen die Wahl der geeigneten Mittel den Ökobilanz-Praktikern. In einzelnen Fällen werden jedoch konkrete und detaillierte Vorgaben gemacht. Dies ist z.B. bei den Anforderungen an die Berichterstattung oder das Durchführen eines kritischen Prüfverfahrens der Fall.

Es muss hier aber darauf hingewiesen werden, dass die Durchführung von Ökobilanzen nicht nach ISO 14040/44 erfolgen *muss*. Es handelt sich um eine Norm die freiwillig eingehalten werden kann und damit mit dem Zusatz «erstellt nach ISO 14040/44» versehen werden darf.

Dieser Zusatz unterstützt die Glaubwürdigkeit der Studie und ermöglicht es die Resultate dieser Studie leichter mit anderen Studien, welche ebenfalls nach dem Standard erstellt wurden, zu vergleichen.

Wird eine Studie mit dem Ziel einer vergleichenden Aussage² veröffentlicht, ist eine kritische Prüfung notwendig, um die ISO-Normen 14040 und 14044 vollständig zu erfüllen. Ausserdem darf der Vergleich in diesem Spezialfall nicht allein auf Basis von vollaggregierenden Methoden (wie z.B. die Methode der ökologischen Knappheit, ReCiPe, Umweltfussabdruck) erfolgen. In vollaggregierenden Methoden werden verschiedene Umwelteinflüsse, basierend z.B. auf politischen Interessen, gewichtet. Die Verfasser der ISO-Standards sehen darin ein erhöhtes Risiko für Fehlinterpretationen.

Gemäss unserer Ansicht ist dies jedoch auch bei der Nutzung von nicht aggregierten Resultaten möglich, da Leser die unterschiedlichen Umwelteinflüsse von z.B. 1 kg Phosphat-Äquivalent und 1kg CO₂-Äquivalent evtl. gleich gewichten könnten.

Da die meisten Studien nicht diesem Ziel verfolgen kann ein Disclaimer eingesetzt werden: «Eine vergleichende Aussage im Sinne der ISO Norm, d.h. eine Umweltaussage zur Überlegenheit oder Gleichwertigkeit eines Produktes im Vergleich zu einem Konkurrenzprodukt mit dem gleichen Verwendungszweck wird hier nicht angestrebt. Damit entfällt die Notwendigkeit für ein Review oder eine Einschränkung hinsichtlich der Verwendung von vollaggregierenden Indikatoren.»

3 Zieldefinition und Untersuchungsrahmen

Die Zielsetzung und der Untersuchungsrahmen werden in diesem Kapitel festgelegt. Soweit möglich erfolgt die Festlegung der Systemgrenzen in Anlehnung an die ISO 14044ff Norm für Ökobilanzen³ (International Organization for Standardization (ISO) 2006a) und an die Vorgaben der europäischen PEF Studie (ECB 2023).

3.1 Fragestellung

Ziel der Studie ist die Erstellung einer PEF-Studie für Euro-Banknoten als Zahlungsmittel für die deutsche Banknoten-Ausgabe bzw. den deutschen Bargeldkreislauf ohne Einbeziehung der Banknoten-Produktion basierend auf den bereits für das Jahr 2019 erhobenen deutschen Umweltdaten nach der Product Environmental Footprint (PEF)-Methode der EU-Kommission (European Commission 2016). Die Dokumentation der Studie erfolgt diesem Bericht und entspricht der Norm ISO 14040 für Ökobilanzen.

Mit der PEF-Studie sollen zwei Ziele erreicht werden:

² Umweltaussage zur Überlegenheit oder Gleichwertigkeit eines Produktes im Vergleich zu einem Konkurrenzprodukt mit dem gleichen Verwendungszweck

³ Das allgemeine Vorgehen bei Ökobilanzen wird auf unserer Homepage [www.esu-services.ch/de/dienstleistungen/case-studies/](https://esu-services.ch/de/dienstleistungen/case-studies/) beschrieben.

- Kenntnisse über den ökologischen Fußabdruck für die untersuchten Lebenszyklus-Phasen der Banknoten-Ausgabe (bzw. des Bargeldkreislaufs für Banknoten) in Deutschland; und
- Ableitung und Erkennen von möglichen Maßnahmen, um den ökologischen Fußabdruck weiter zu reduzieren.

3.2 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit wird wie folgt definiert:

«Durchschnittliche jährliche Barzahlungen einer erwachsenen Person im Jahr 2019 in Deutschland» (bezogen auf die Banknoten-Ausgabe bzw. den Bargeldkreislauf).

Mittels der EZB-Zahlungsverhaltensstudie (ECB 2021) werden die durchschnittlichen jährlichen Barzahlungen eines Euro-Bürgers (Euro Area Citizen/ EAC) ermittelt. Sie betragen rund 7'176 €.⁴ Dieser Betrag aus der EZB-PEF-Studie wird auf die deutsche PEF-Studie übertragen. Die funktionelle Einheit bezieht sich nur auf Personen über 18 Jahre; es wird davon ausgegangen, dass nur diese in der Lage sind, einen solchen Zahlungsbetrag pro Jahr zu leisten. Im Jahr 2019 betrug die Anzahl der Personen über 18 Jahre in Deutschland 69'421'785 (siehe Anhang C). Pro erwachsene Person wurden etwa 7'000 Euro in bar pro Jahr bezahlt.

Barzahlungen umfassen Banknoten und Münzen, aber Münzen werden in dieser Studie nicht betrachtet.

Barabhebung am POS (Point-of-Sale) werden nicht berücksichtigt. Bei diesen entfällt ein Teil der Prozessschritte und sie schneiden deshalb unter Umständen umweltfreundlicher ab.

Die funktionelle Einheit ist so gewählt, um

- eine Verbindung zur Bezahlungsfunktion von Banknoten herzustellen;
- einen Vergleich mit anderen Zahlungsmitteln, Produkten oder alltäglichen Aktivitäten zu ermöglichen; und
- die Vergleichbarkeit zur EZB-PEF-Studie herzustellen.

3.3 Untergliederung des Lebenszyklus

Der gesamte Lebenszyklus für Banknoten wurde in der EZB-PEF-Studie in zwei Blöcke (siehe Fig. 3.1) mit fünf Lebenszyklus-Phasen eingeteilt. Für die nun zu erstellende PEF-Studie wird nur der sog. Block 2 (Issuance- oder Ausgabe-Block) und die Lebenszyklus-Phasen Verteilung, Nutzung und Entsorgung von Euro-Banknoten betrachtet, so dass es sich hierbei nur um eine Teil-PEF-Studie handelt.

Die ausgeschriebene PEF-Studie zielt darauf ab, den ökologischen Fußabdruck der deutschen Banknoten Ausgabe bzw. des deutschen Bargeldkreislaufs basierend auf den bereits erhobenen deutschen Umweltdaten aus dem Jahr 2019 zu ermitteln. Die funktionelle Einheit der deutschen PEF-Studie lautet: «Durchschnittliche jährliche Barzahlungen einer Person im Jahr 2019» (bezogen auf die Banknoten-Ausgabe bzw. den Bargeldkreislauf). Die Studie umfasst die Lebenszyklus-Phasen Verteilung, Nutzung und Lebensende von Euro-Banknoten sowie entsprechende nachgelagerte Prozesse und Aktivitäten (siehe Tab. 3.1).

⁴ Study on the payment attitudes of consumers in the euro area (SPACE), EZB, Dezember 2020 (Link: [Study on the payment attitudes of consumers in the euro area \(europa.eu\)](https://www.esu-services.ch/en/studies/2020/01/study-on-the-payment-attitudes-of-consumers-in-the-euro-area)): Die Bürger des Euro-Währungsgebiets machten durchschnittlich 1,6 POS- und P2P-Transaktionen pro Tag mit einem durchschnittlichen Transaktionswert von 25,60 €. Bargeld macht 48 % der wertmäßigen POS- und P2P-Zahlungen aus ($1,6 \cdot 365 \cdot 25,60 \cdot 0,48 = 7.176 \text{ €}$).

Tab. 3.1 Hauptkomponenten jeder Lebenszyklus-Phase des PEF-Modells für die Banknoten-Ausgabe (vereinfachte Darstellung)

Lebenszyklus-phase	Aktivitäten/ Prozesse	Inputs für das PEF-Modell
Verteilung	Transport (NZB, WDL)	Nationale und grenzüberschreitende Transporte
	Verteilung über GAA	Nationaler Niederspannung-Strommix
	Energie, Verbrauchsmaterialien und Abfall bei Bearbeitungstätigkeiten (NZB, WDL, KI)	Stromverbrauch, Wärme, Wasser, Verbrauchsmaterialien und Abfall
Nutzung	Echtheitsprüfung am POS	Nationaler Niederspannung-Strommix
Entsorgung	Entsorgung von geschredderten Banknoten	Transport der geschredderten Banknoten und Verbrennung

Der **Issuance- bzw. Ausgabe-Block** beinhaltet Aktivitäten der Stakeholder (Handel, KI, NZB und WDL) sowie die Lebenszyklus-Phasen Verteilung, Nutzung und Lebensende. Die Ergebnisse dieses Blocks sind direkt mit der funktionellen Einheit verknüpft, da die genannten Aktivitäten die Zahlungsfunktion des Bargeldes unterstützen. Die gesamten Umweltauswirkungen können direkt der funktionellen Einheit zugeordnet werden, indem sie durch die Gesamtzahl der Personen über 18 Jahre in Deutschland dividiert werden.

Die **Verteilungsphase** umfasst den Banknoten-Transport innerhalb des NZB-Filialsystems. Diese Transporte werden von der NZB mit eigenen Transport-Fahrzeugen ausgeführt.⁵ Die Banknoten-Ausgabe erfolgt durch das NZB-Filialsystem. Die Banknoten-Transporte von den NZB-Filialen zu den KI erfolgt durch die WDL. «Notes Held-to-order Schemes (NHTO)»⁶ gibt es in Deutschland nicht. Die Banknoten werden über das KI-Filialnetz und die Geldausgabeautomaten (Geldautomaten und kundenbediente Geräte = GAA) und in geringerem Umfang über Cash back⁷ bzw. Cash-in-Shop⁸ im Handel an die Verbraucher/ Konsumenten verteilt. GAA bilden mit Abstand den wichtigsten Zugang der Öffentlichkeit zu Euro-Banknoten.

Nach der Verwendung z.B. für die Bezahlung von Waren und Dienstleistungen oder bei Person-to-Person (P2P)-Transaktionen, gelangen die Banknoten durch WDL-Transporte wieder zurück zur NZB. Dort werden sie mittels Hochleistungsbearbeitungsmaschinen auf Echtheit und Umlauffähigkeit geprüft. Nicht mehr umlauffähige Banknoten werden von der NZB geschreddert. Auch über KI können die Banknoten nach einer zumeist maschinellen Prüfung basierend auf vorgegebenen Eurosystem-Regeln wieder dem Bargeldkreislauf zugeführt werden (Sekundär-Umlauf). Die Hauptprozesse in der Verteilungsphase, die sich auf die Umwelt auswirken, sind der Transport und die Energie, die für die Bearbeitung, Sortierung und Echtheitsprüfung von Banknoten verwendet wird. Weitere Bearbeitungsaktivitäten und -prozesse, wie z. B. Verbrauchsmaterialien für Verpackungen und Verpackungsabfälle, werden ebenfalls in dieser Stufe einbezogen.

Die **Nutzungsphase** umfasst den Stromverbrauch für die Echtheitsprüfung im Handel am Point-of-Sale (POS) mit sog. Banknotenprüfgeräten (Banknote Authentication Devices/ BAD) und mit Self-Checkout-Terminals (SCoT). Die Aktivitäten der Verbraucher/ Konsumenten haben hinsichtlich der Umweltauswirkungen keine Bedeutung und werden daher bei der Betrachtung der Umweltauswirkungen ausgeschlossen.

⁵ In der Verteilungsphase sind nicht nur nationale NZB-Transporte innerhalb des NZB-Filialsystems enthalten, sondern auch grenzüberschreitende NZB-Transporte. Hierzu gehören NZB-Flugzeug-Transporte als auch NZB-Land-Transporte druckfrischer Banknoten.

⁶ An private Unternehmen ausgelagerte Banknoten-Bestände der Zentralbank.

⁷ Bargeldabhebung an der Ladenkasse (max. 200 €) in Verbindung mit einem Einkauf im (Einzel-)Handel.

⁸ Bargeldabhebung/-einzahlung in einem Geschäft unabhängig vom Einkauf im (Einzel-)Handel.

Euro-Banknoten, die als nicht umlauffähig gelten, werden an die NZB zurückgegeben und dort nochmals überprüft und schließlich vernichtet (geschreddert), wenn sie nicht mehr den Eignungskriterien entsprechen. Dann beginnt der Prozess «**Lebensende von Banknoten**». Diese Stufe umfasst den Transport der geschredderten Banknoten zu den Endnutzungszielen (in Deutschland: Verbrennung mit Energierückgewinnung). Die vernichteten (geschredderten) Banknoten werden von der NZB durch neue oder umlauffähige Banknoten ersetzt und ein neuer Bargeldkreislauf beginnt.

3.4 Geographische Rahmenbedingungen

Die Studie wird für die Situation in Deutschland erstellt.

Es ist unter Umständen nicht möglich bei allen Aspekten genau den Durchschnitt für Deutschland abzubilden. Deshalb wird mit realistischen Szenarien gerechnet.

Die Ergebnisse lassen sich nicht ohne weiteres auf andere Länder übertragen.

Anpassungen an den Datensätzen an die Situation in Deutschland werden im Vordergrundsystem der hier neu modellierten Daten vorgenommen. Im Hintergrund werden bereits vorhandene Datensätze aus der europäischen Datenbank verwendet, welche möglichst gut auf die Situation zutreffen. Z.B. werden für die meisten verwendeten Transportmittel Datensätze für die Situation in Europa verwendet. Wo keine Daten für die deutsche, europäische oder die globale Situation vorliegen, wird, falls vorhanden auch auf Datensätze aus anderen Ländern zurückgegriffen.

3.5 Zeitliche Rahmenbedingungen

Die Vordergrunddaten wurden für das Jahr 2019 erhoben.

3.6 Systemgrenzen

In der Studie wird der gesamte Lebenszyklus gemäss der EZB-PEF-Studie untersucht (vgl. Fig. 3.1). Dazu gehören Verteilung, Nutzung und Lebensende von Euro-Banknoten. Die Produktion der Banknoten (Rohstoffe und Druck) wird nicht berücksichtigt.

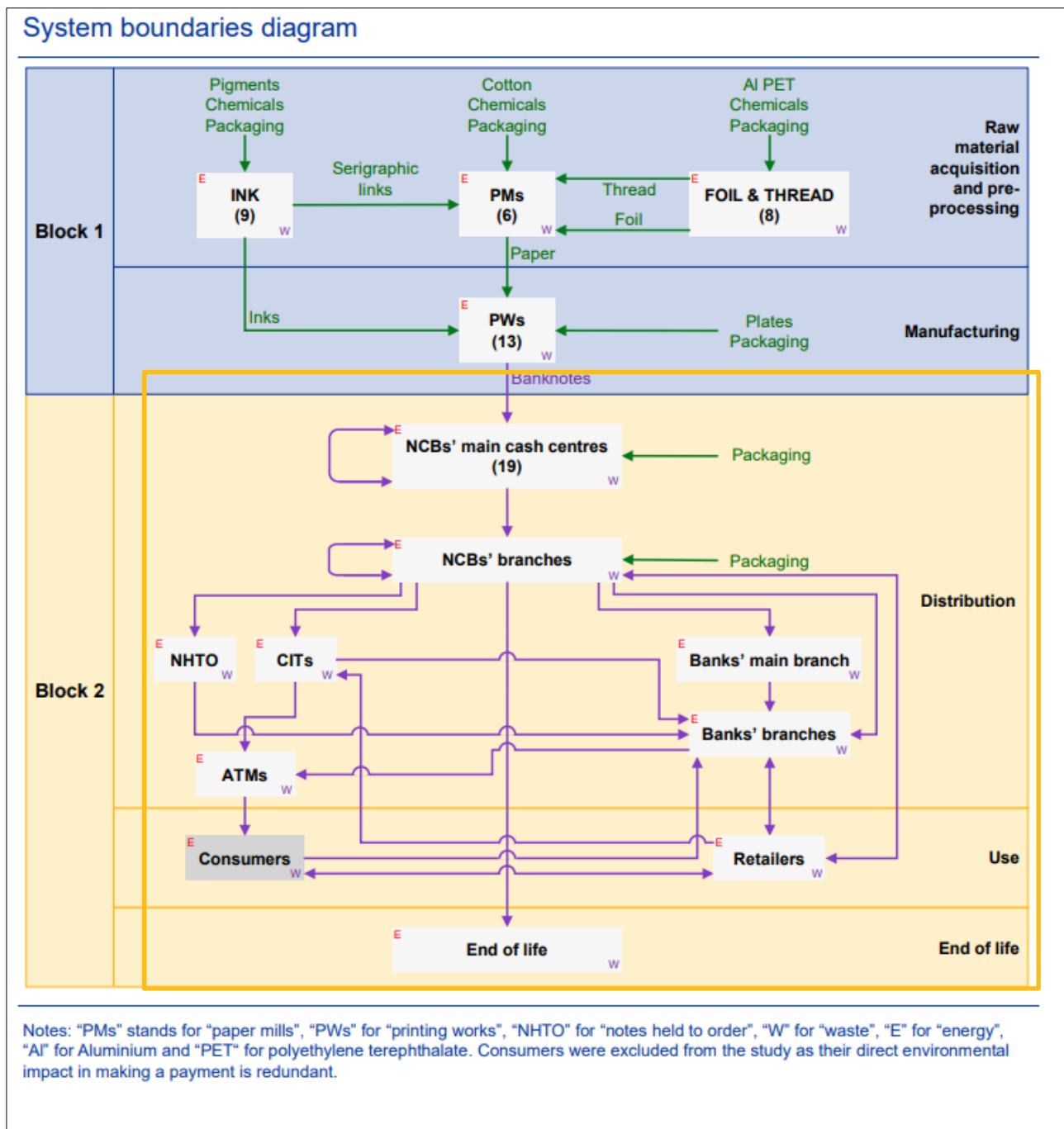


Fig. 3.1 Systemgrenzen gemäß EZB-PEF-Studie (ECB 2023). Das orangene Rechteck stellt die Systemgrenzen der Studie dar.

Die untersuchten Phasen des Lebenszyklus werden in Fig. 3.2 dargestellt.

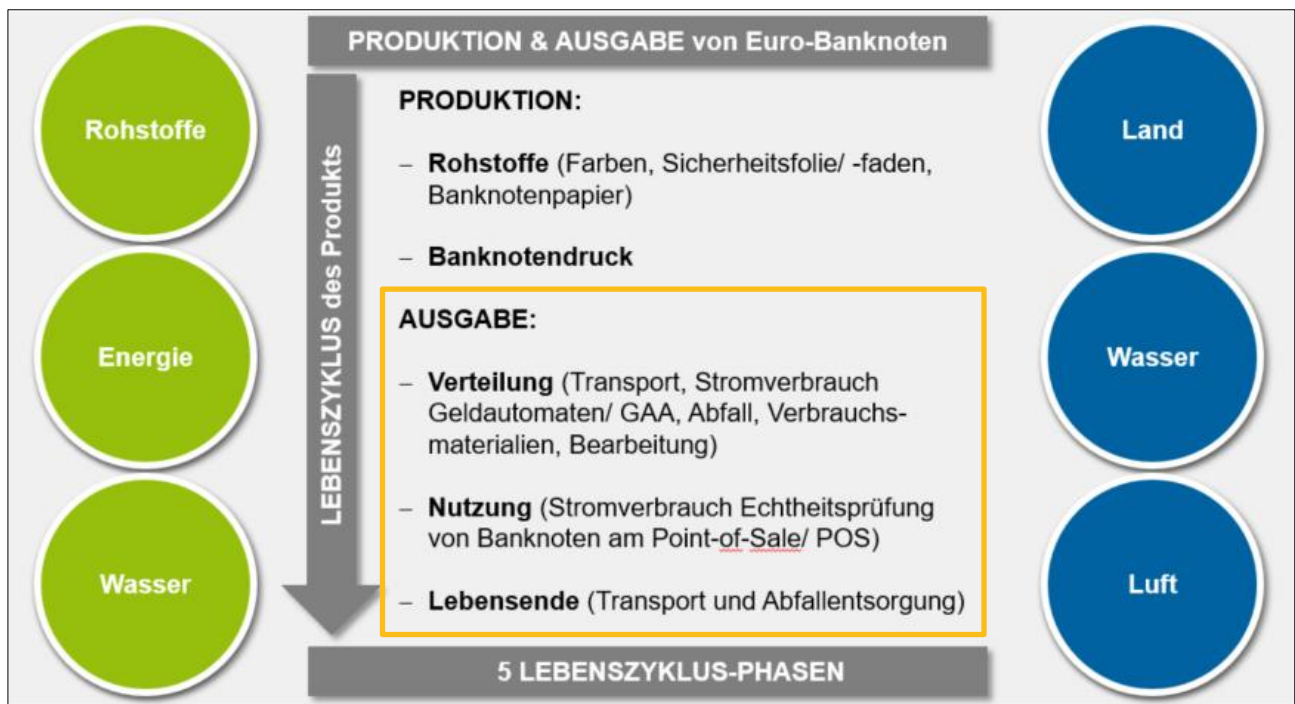


Fig. 3.2 Lebenszyklus-Phasen (vereinfachte Darstellung). Das orangene Rechteck stellt die Systemgrenzen der Studie dar.

3.7 Abschneidekriterien

Für die in Kapitel 3.6 beschriebenen Lebenszyklen werden Energie- und Stoffflüsse inklusive Direkt-emissionen und Emissionen in der Vorkette berücksichtigt.

Die Abschneidekriterien bezüglich Masse, Energie und Umweltrelevanz werden entsprechend ISO 14044 Absatz 4.2.3.3.3 angewendet:

- Bezüglich des Massekriteriums gilt folgende Mindestanforderung: 1 % pro Prozessmodul; maximal 5 % kumulierend.
- Bezüglich Energie gilt folgende Mindestanforderung: 1 % pro Prozessmodul; maximal 5 % kumulierend.
- Bezüglich Umweltrelevanz gilt folgende Mindestanforderung: Nachvollziehbare Beschreibung der Vorgehensweise.

Folgende weitere Systemgrenzen zur Abschneidung von Teilaspekten wurden von der Deutschen Bundesbank entsprechend der europäischen Studie vorgegeben:

- Herstellung von Investitionsgütern, einschließlich Maschinen, Ausrüstungen und Anlagen.
- Personenkraftwagen (Pkw)-Transporte von Banknoten durch den Einzelhandel.⁹

⁹ Einige (kleinere) Einzelhändler bringen ihre Bareinnahmen in ihren Privatwagen zu Kreditinstituten. Es ist schwierig, einen bestimmten Teil des Pkw-Transports Banknoten zuzuordnen, da der Pkw-Transport auch für andere zusätzliche Zwecke erfolgt (Auslieferung, Wareneinkauf, Geschäftsschluss, etc.).

- Pkw-Fahrten von Verbrauchern/ Konsumenten zu GAA oder Bankfilialen zur Bargeldabhebung.¹⁰
- Banknoten, die zur Wertaufbewahrung verwendet werden. Diese Banknoten können künftig, aber nicht im betrachteten Kalenderjahr verwendet werden. In der Verteilungsphase von Euro-Banknoten (vor allem bei dem Transport und den GAA) kann jedoch nicht zwischen Euro-Banknoten unterschieden werden, die einerseits für die Transaktionsfunktion und andererseits für die Wertaufbewahrungsfunktion verwendet werden sollen. Da beide Banknoten-Funktionen darin enthalten sind (und die funktionelle Einheit nur die Transaktionsfunktion des Bargeldes berücksichtigt), könnten die Umweltauswirkungen für den Bargeldkreislauf bzw. die Banknoten-Ausgabe überschätzt sein. Die Bewertung schließt auch die Geldbörsen und Safes aus, die von der Öffentlichkeit zur Aufbewahrung des Geldes genutzt werden.
- Verwendung von Banknoten für den direkten Austausch zwischen Verbrauchern/ Konsumenten, da keine zusätzlichen Umweltauswirkungen festgestellt werden.
- Die Energie, die für den Betrieb von Kassenschubladen (auch Kassenladen genannt) verwendet wird, da sie in die elektronischen Verkaufsstellen bzw. -einheiten (Electronic-Point-of-Sale/EPOS-Einheiten) integriert sind, deren Funktionalität allerdings über die Bargeldbearbeitung hinausgehende Scan- und Ticketerstellungsfunktionen umfasst. EPOS-Einheiten verbrauchen insgesamt rund 150 Kilowattstunden (kWh) pro Jahr, wobei der Teil des Bargeldgeschäfts (Öffnung der Kassenschublade) als vernachlässigbar angesehen werden kann. Beim Auslösen der Schublade muss nur noch für einige Millisekunden ein Relay eingeschaltet werden; die Bewegung wird durch Federn erzeugt.
- Banknoten, die versehentlich von einer Person vernichtet oder weggeworfen werden oder während der Nutzungsphase verloren gehen. Nur die NZB darf Euro-Banknoten vernichten (schreddern).
- Kantinen- und Sozial-/ Verwaltungsaktivitäten bei Stakeholdern.
- Personalwesen und Verwaltung sowie Dienstreisen von Mitarbeitenden.

3.8 Allokation bei Entsorgung von Banknoten

Die Festlegung von Allokationsfaktoren lässt sich häufig nicht allein mit wissenschaftlichen Erwägungen begründen, sondern stellt eine Konvention dar, in die auch Werthaltungen einfließen.

Wird das Sekundärmaterial in einem anderen als dem ursprünglichen Produktsystem verwendet, spricht man von Open-Loop-Recycling (offener Kreislauf).

Teilweise ist z.B. der 50%:50%-Ansatz zu finden, wobei die Hälfte der Belastungen durch die Primärproduktion der Erstnutzung und die zweite Hälfte den Folgenutzungen angelastet wird.

Im Cut-Off Ansatz werden die aktuellen Rezyklat-Anteile in der Materialbereitstellung berücksichtigt. Andere Ansätze gehen unter Umständen von der technischen Recyclingfähigkeit aus, die dann deutlich höher liegen kann, aber nicht den aktuellen Markt abbildet.

In der vorliegenden Studie wird die End-of-Life-Allokation in Open-loop-Systemen die Verwendung von recyceltem Material sowie die Entsorgung der Produkte mithilfe der «Circular Footprint Formula» (CFF) modelliert. Dieser Modellierungsansatz wurde im Rahmen der PEF-Methodik von der Europäischen Kommission entwickelt (Zampori & Pant 2019). Er stellt eine standardisierte Methode dar, um die Vorteile und Belastungen des Produktrecyclings oder der Verwendung von recyceltem Material zwischen dem Hersteller und dem Nutzer des recycelten Materials aufzuteilen. Dadurch

¹⁰ Konsumenten/ Verbraucher nutzen teilweise ihr Auto, um GAA oder Bankfilialen für Bargeldabhebungen zu erreichen. Es ist schwierig, einen bestimmten Teil der Pkw-Fahrt Banknoten zuzuordnen, da die Pkw-Fahrten zur Bargeldabhebung wahrscheinlich mit zusätzlichen Zwecken (Einkauf, Besuche, Arbeit, etc.) kombiniert werden.

können die zusätzlichen potenziellen Vorteile des Recyclings oder der Energierückgewinnung bewertet werden. Allerdings ist dieser Ansatz nicht vollständig mit dem Cut-off-Ansatz konsistent, der in der Hintergrunddatenbank angewendet wird. Eine detaillierte Beschreibung der CFF, der gewählten Parameter und Variablen ist in Anhang B zu finden. Die CFF wurde in dieser Studie auf die Materialien der Verteilungsphase angewendet. Dort werden vor allem Verpackungsmaterialien wie Plastik und Karton verwendet.

3.9 Sensitivitätsanalysen

Die Sensitivitätsanalyse bewertet, wie empfindlich die Ergebnisse der Ökobilanz auf Änderungen bestimmter Sachbilanzdaten und Annahmen reagieren, sofern diese z.B. nicht genau bekannt sind. Beispiele für solche Parameter sind:

- **Energieverbrauch:** Wie stark beeinflusst eine Änderung der Annahme zum Energieverbrauch die Umweltbilanz?
- **Transportdistanz:** Welche Auswirkungen hat die Annahme für eine längere oder kürzere Transportstrecke?
- **Wahl der Hintergrunddatensätze:** Wie verändert sich die Ökobilanz bei der Verwendung alternativer Datensätze bei unsicherer Zuordnung?

Diese Analyse hilft, Unsicherheiten zu reduzieren und die Robustheit der Endergebnisse hinsichtlich Annahmen in der Sachbilanz zu überprüfen.

Im Rahmen der Studie werden folgende Sensitivitätsanalysen gerechnet:

- **Abschätzung zum Stromverbrauch in verschiedenen Prozessen:** Es wird für die drei verschiedenen Stromverbräuche für Geldausgabeautomaten, für die Bearbeitung in der Verteilungsphase und für die Nutzungsphase, der Stromverbrauch um 10% und 50% variiert, um zu sehen, wie sich dies auf das Gesamtergebnis der Studie auswirkt. Die berechneten Analysen werden in Kapitel 6 im Detail beschrieben.

3.10 Szenarioanalysen

Die Szenarioanalyse untersucht verschiedene zukünftige Entwicklungen oder Alternativen, um die Auswirkungen auf die Umwelt zu vergleichen. Dabei werden unterschiedliche Annahmen getroffen, wie z. B.:

- **Technologische Änderungen:** Einführung neuer Produktionsmethoden (z.B. mehr erneuerbarer Strom im Strommix) oder alternativer neuer Materialien.
- **Veränderungen im Verbraucherverhalten:** Erhöhung der Recyclingrate.
- **Politische Maßnahmen:** Einführung von CO₂-Steuern.

Ziel ist es, die besten Optionen für eine nachhaltige Entwicklung zu identifizieren und die Entscheidungsfindung zu unterstützen.

In dieser Studie werden folgende Szenarien betrachtet:

- **Energiemix:** Beim Energieverbrauch wurden verschiedene Energieträger und ein erneuerbarer Energiemix für die verschiedenen Stromverbräuche eingesetzt und miteinander verglichen.
- **Transport mit Elektrofahrzeugen:** Da der nationale Transport der WDL den Grossteil der Transporte ausmacht, wurden die Szenarios nur für diesen Transport berechnet, indem die herkömmlichen Transportfahrzeuge mit Elektrofahrzeugen ausgetauscht wurden. Daten für andere mögliche

Technologien zur vollständigen Vermeidung von direkten CO₂ Emissionen, wie Wasserstoff oder Synthetische Treibstoffe, standen in der Datenbank nicht zur Verfügung.

Die Resultate der Szenarioanalysen sind in Kapitel 7 zu finden.

3.11 Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment)

Die EZB-PEF-Studie basierte für die Bewertung der Umweltbelastungen auf der Environmental Footprint (EF) Methode Version (V) 2.0. Bei der EZB-PEF-Studie wurden die drei Toxizität-Wirkungskategorien für Cancer Human Health, Non-Cancer Human Health und Ecotoxicity Freshwater aufgrund von Berechnungsungenauigkeiten in der EF Methode V 2.0 ausgeschlossen.

Für die vorliegende Studie wird die aktualisierte [EF Methode v3.1](#) und die EF 3.1 Datenbank verwendet, in der im Gegensatz zur V 2.0 u.a. die drei Toxizitätskategorien integriert sind (Andreasi Bassi et al. 2023). Ein direkter Vergleich der Ergebnisse zwischen der EZB-PEF-Studie und der deutschen PEF-Studie ist deshalb nicht gegeben.

Für die Studie werden verschiedene Arten von potenziellen Umweltbelastungen in Luft, Wasser und Boden mit der europäischen Methode für den Umweltfußabdruck bewertet und zu einem Punktwert zusammengefasst (Andreasi Bassi et al. 2023). Diese Methode wird im Rahmen der europäischen Bestrebungen zur Umweltinformationen von Produkten (Product Environmental Footprint) entwickelt. Sie ist damit bereits auf die zukünftige Anwendung für die Information von Konsumierenden hin entwickelt worden. Auch für die B2B Kommunikation im Rahmen von Umweltdeklarationen wird diese Methode und ihre Wirkungskategorien in Europa angewandt (European Committee for Standardisation (CEN) 2022).

Tab. 9.1 im Anhang A.1 zeigt eine Beschreibung der berücksichtigten Wirkungskategorien auf mid-point-Ebene. Eine detaillierte Beschreibung der berücksichtigten Wirkungskategorien befindet sich im Anhang A. Die Methode wird gewählt, weil sie eine gut verständliche und repräsentative Übersicht der wichtigsten Umweltbelastungen im europäischen Kontext beinhaltet.

In dieser Methode wird ein Gewichtungssatz für die verschiedenen Wirkungsindikatoren zu einem Gesamtpunktwert vorgegeben (Andreasi Bassi et al. 2023). Das Set enthält Gewichtungsfaktoren für alle Wirkungsindikatoren auf Midpoint-Ebene, ist in der Ökobilanz-Software SimaPro standardmäßig implementiert und wird in der vorliegenden Studie verwendet (vgl. Kapitel 5).

Die ISO-Norm hat gegenüber der Anwendung von solchen Gesamtbewertungen Vorbehalte, wenn vergleichende Ergebnisse veröffentlicht werden. Dies ist in der vorliegenden Studie kein Hinderungsgrund, da keine Vergleiche gemacht werden.

Auch das deutsche Umweltbundesamt spricht sich dezidiert gegen die Verwendung von aggregierten Gesamtergebnissen in Ökobilanzen aus.¹¹ Das deutsche Umweltbundesamt bevorzugt die verbal-argumentativ Auswertung der Studienergebnisse (UBA 1999). In der Schweiz (BAFU 2021), aber auch auf europäischer Ebene (Andreasi Bassi et al. 2023) wurden hingegen mit Unterstützung öffentlicher Einrichtungen Bewertungsmethoden entwickelt, um die Durchführung von Ökobilanzen zu vereinfachen und die Anwendbarkeit zu verbessern.

Aus Sicht der Autoren der vorliegenden Studie hilft die Analyse der gewichteten, potenziellen Gesamtumweltbelastungen, die Ergebnisse in den verschiedenen Wirkungskategorien besser einzuordnen und Konsumierende bei der Entscheidung für umweltfreundliche Produkte zu unterstützen und ist in Übereinstimmung mit den Regeln für PEF-Studien.

¹¹ Beschluss Amtsleitung Umweltbundesamt 9.11.2016

Für eine vereinfachte Interpretation werden auch normierte, gewichtete Einzelergebnisse gezeigt und diskutiert. Die dafür verwendeten Normierungs- und Gewichtungsfaktoren werden in Tab. 9.2 im Anhang gezeigt.

Außerdem werden alle Ergebnisse für die Wirkungskategorien in den jeweiligen Einheiten im Kapitel 5.1 dokumentiert und damit auch die Anforderungen der ISO-Norm erfüllt.

3.12 Veröffentlichung

Die Studie dient der Information. Sie wird für die Arbeit des Auftraggebers erstellt und soll in der vorliegenden Form veröffentlicht werden. Sofern dabei vom Auftraggeber oder Dritten Schlussfolgerungen gezogen werden oder nur Ausschnitte der Gesamtstudie gezeigt werden, liegen diese nicht in der Verantwortung von Autoren und Prüfenden. Die gesamte Studie inklusive Review Statement kann ohne vertraulichen Daten-Anhang veröffentlicht werden.

3.13 Unsicherheitsanalysen

Im Rahmen dieser Studie werden keine Unsicherheitsanalysen durchgeführt.

3.14 Kritische Prüfung

Die Ökobilanz wird soweit möglich gemäß der ISO-Normen 14040/44/74 erstellt (International Organization for Standardization (ISO) 2006b, c, 2022). Eine Veröffentlichung ist vorgesehen. Bei einer Veröffentlichung der Studie werden die Vorgaben der ISO-Normen 14040/44 für Ökobilanzen nur dann vollständig erfüllt, wenn eine externe kritische Prüfung der Gesamtstudie durchgeführt wird (International Organization for Standardization (ISO) 2006a).

Die kritische Prüfung erfolgt studienbegleitend durch Dr. Conrad Spindler, GeenDelta, Berlin. Der Bericht zur kritischen Prüfung wird im Anhang D gezeigt.

4 Sachbilanz (Life Cycle Inventory)

Die Sachbilanz (Life Cycle Inventory/ LCI) ist eine Zusammenstellung mit allen Inputs und Outputs zu Verbrauchsmaterialien, Energie und Abfall und deren Auswirkungen auf Luft, Wasser und Boden als Basis für die PEF-Modellierung (siehe Fig. 5.1).

Für die Erstellung der Sachbilanz wurde in den Jahren 2020 und 2021 durch den Auftraggeber eine Daten-Erhebung für das Jahr 2019 bei den Key Stakeholdern für das Bargeld durchgeführt. Diese wurde den Autoren zur Verfügung gestellt und in einer Sachbilanz mit den Datensätzen der Hintergrunddatenbank verknüpft.

4.1 Datenerhebung

Die Datenerhebung in Deutschland erfolgte im Jahr 2020 für das Jahr 2019 bei KI und WDL mittels Umwelt-Fragebogen durch den Auftraggeber. Die Datenermittlung für den Handel (einschließlich Bewirtung) erfolgte durch Schätzung bzw. durch Kontaktaufnahme mit dem EHI Retail Institute/ Köln.

Vorgehensweise bei der KI-Datenerhebung:

- Von den ca. 1'500 KI wurden KI ohne Bargeldgeschäft ausgenommen; im Ergebnis blieben ca. 1'300 KI übrig.

- Aus diesen 1'300 KI wurde eine Stichprobe von 230 KI genommen, bestehend aus zwei Gruppen mit 30 größeren KI (nach ihrer Bilanzsumme) und 200 weiteren KI (zufällig ausgewählt aus den verbleibenden 1'270 KI).
- Insgesamt gab es 95 ausgefüllte Umwelt-Fragebögen von 10 größeren KI und 85 weiteren KI.
- Die Ergebnisse der Hochrechnung der Zufallsstichprobe und der Stichprobe der 30 größten KI wurden addiert und aggregiert.

Vorgehensweise bei der WDL-Datenerhebung:

- Es erfolgte eine Kontaktaufnahme mit der Bundesvereinigung Deutscher Geld- und Wertdienste (BDGW) zur Abstimmung des EZB-Umwelt-Fragebogens und zur Datenerhebung.
- Eine Rückmeldung auf den Umwelt-Fragebogen erfolgte von den beiden größten WDL in Deutschland.
- Die Nachfassaktion bei kleineren und mittleren Unternehmen erbrachte keine weiteren Rückmeldungen.
- Herausforderungen waren u.a. die Umweltdaten-Erhebung im Corona-Jahr (2. Hj. 2020), der hohe Detaillierungsgrad des Fragebogens (Zeit- und Arbeitsaufwand) und die teilweise nicht vorhandenen Umweltdaten.
- Es erfolgte eine Hochrechnung der beiden Rückmeldungen auf den gesamten WDL-Markt in Deutschland (Annahme: 50% Marktanteil der beiden großen WDL).

Für die Anzahl der GAA werden die regelmäßig von KI der NZB vorzulegenden Daten herangezogen. Für die Schätzung des Energieverbrauchs von GAA hat die EZB große GAA-Hersteller kontaktiert. Auch die Schätzung des Energieverbrauchs für Banknotenprüfgeräte und Self-Checkout Terminals (SCoT) im Handel erfolgte durch EZB-Kontaktaufnahme mit Herstellern solcher Systeme. Daten zur Bevölkerungszahl bei Erwachsenen wurden von Eurostat bezogen. Der Durchschnittswert der jährlichen Bargeldtransaktion pro Person im Jahr 2019 wurde mithilfe der EZB-Zahlungsverhaltensstudie (ECB 2021) ermittelt.

Die ermittelten Daten werden entsprechenden Lebenszyklen-Phasen, Aktivitäten/ Prozessen und dem PEF-Modell zugeordnet. Die Hauptkomponenten der einzelnen Modell-Phasen sind in Tab. 4.1 aufgeführt.

4.2 Hintergrunddatenbank - Environmental Footprint database v3.1 (2023)

Die Environmental Footprint (EF)-Datenbank (ELCD 2023) wurde entwickelt, um die Verwendung von Regeln für den Produkt-Umweltfußabdruck (PEF) (PEFCR) und Organisation-Umweltfußabdruck (OEF) (OEFSR) zu unterstützen. Sie enthält sekundäre EF-konforme Sachbilanzdatensätze und eine kompatible EF-Bewertungsmethode. Die Datenbank Environmental Footprint ist Teil der Initiative der Europäischen Kommission für den Binnenmarkt für umweltfreundliche Produkte. Die EF Datenbank enthält (European Commission 2021):

- EF und ILCD-konforme Datensätze
- EF-Bewertungsmethode
- Standardparameter zur Verwendung mit der Circular Footprint Formula (CFF), aus Anhang C der Guidance v6.3. Sie sind als Datenbankparameter in SimaPro implementiert und erleichtern die Modellierung der CFF.

Die EF Database enthält ca. 3'200 Datensätze zu den folgenden Themen:

- Landwirtschaft und Nahrungsmittel
- Chemikalien
- Chemikalien für Farben
- Kühl- und Gefriertransport
- Elektronik
- Ende der Lebensdauer
- Energie und Verkehr
- Feed
- Glasrecycling
- Verbrennung
- Metalle
- Andere
- Verpackung
- Kunststoffe

Manche der Datensätze enthalten Dummy Prozesse aufgrund von fehlenden Prozessen oder auch um gewisse Datensätze anpassen zu können. In diesem Projekt wurde nur ein Datensatz verwendet, bei welchem so ein Dummy Prozess ersetzt werden muss: *«Plastic granulate secondary (low metal contamination) {EU-28} | from post-consumer plastic waste, via grinding, metal separation, washing, pelletization | production mix, at plant | plastic waste with low metal fraction | Partly terminated system»*. Dort wurde der Plastik Dummy mit dem Datensatz: *«Low density polyethylene (LDPE), fossil fuel-based {GLO} | polymerisation of fossil-based ethylene | production mix, at plant | petrochemical based | LCI result»* ersetzt. Die Dummies für Metallfraktionen wurden nicht ersetzt, da angenommen wird, dass in den Verpackungsmaterialien aus Plastik kein Metall enthalten ist.

4.3 Modellierung

Eine blanko Input-Output-Tabelle wurde den NZBen von der EZB zur Verfügung gestellt. Die in dieser Tabelle zusammengestellten Umweltdaten basieren auf den deutschen Umwelt-Fragbögen Handel, KI, NZB und WDL.

Die ausgefüllte Input-Tabelle mit den Gesamtdaten wurde von der Deutschen Bundesbank dann in Excel für den Auftragnehmer zur Verfügung gestellt (siehe Anhang E).

Die Sachbilanz-Modellierung wird von ESU-services zunächst in Excel vorbereitet, und dann in die Software SimaPro importiert (SimaPro 2025).

Jeder Input-Grösse wurde in dieser Excel-Tabelle ein entsprechender Prozess aus der EF Datenbank zugewiesen, der als Datensatz bezeichnet wird. Ein Datensatz ist eine Datei mit Lebenszyklus-Informationen eines bestimmten Produkts oder einer anderen Referenz (z. B. Standort, Prozess). Beispielsweise wird dem Wasser-Input ein Datensatz mit dem Namen *«Tap water {EU-28+3} | technology mix | at user | per kg water | LCI result»* zugewiesen (gem. EZB-PEF-Studie). Da die ursprünglich gewählten Datensätze auf der alten Version der EF-Datenbank basierten, musste die Zuweisung mit der Version 3.1 aktualisiert werden.

Weitere in der Tabelle ggf. erforderliche Anpassungen und Berechnungen nach der PEF-Methode wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber vorgenommen. Diese beinhalten Umrechnungen zur passenden Einheit des Datensatzes, Berücksichtigung der Nutzlast bei den Transportprozessen,

Anpassungen zur Aufrechterhaltung der Massenbilanz bei den Verpackungsmaterialien und Berücksichtigung der Circular Footprint Methode bei der Entsorgung. Alle Anpassungen sind in den folgenden Kapiteln detaillierter beschrieben.

Nachfolgend wird beschrieben wie spezifische Lebenszyklus-Stufen, Prozesse und andere wichtige Aspekte des Produkt-Lebenszyklus modelliert werden, um die Sachbilanz zu erstellen. Die vollständige Sachbilanz steht für das Review in SimaPro zur Verfügung und kann in der Excel Tabelle angeschaut werden.

Tab. 4.1 Überblick zur Modellierung mit Phasen, Kategorien und Datensätzen

Lebenszyklus-phase	Prozess Kategorie	Subkategorie	Prozess/Datensatz im SimaPro Model
Verteilung	Transport	National	NCBs national transport CITs national transport
		International	NCBs cross-border transport
	Bargeldbezug an Geldausgabautomaten	Energie	Banknote withdrawal at banknote handling machines
	Bearbeitungstätigkeiten	Energie und Wärme	Energy for other processing activities at NCBs/CITs/Cis
		Verpackungsmaterial und Wasser	Packaging consumables and water for other processing activities
		Abfall	Waste for other processing activities
Nutzung	Authentifizierungsprüfungen am POS	Energie	Energy consumption of Banknote Authentication Devices at POS and of Self-Checkout Terminals that accept banknotes
Entsorgung	Entsorgung der geschredderten Banknoten	Transport	Transport of shredded banknotes from NCB to incineration
		Verbrennung mit Energierückgewinnung	Final disposal of shredded banknotes

4.4 Verteilung

4.4.1 Transport

Der Transport wird in nationalen und grenzübergreifenden Transport unterteilt.

Kg/km wurde direkt im Fragebogen für die Wertdienstleister erhoben. Basierend auf zwei ausgefüllten WDL-Fragebögen mit einem Marktanteil von 50% erfolgte eine Hochrechnung auf den Gesamtmarkt. Die Daten wurden von der Bundesbank aus detaillierten Fragebögen bereits zusammengefasst. Detaillierte Einzelantworten liegen ESU nicht vor.

Die neu produzierten Euro-Banknoten werden von der Druckerei zu der NZB transportiert, welches in den grenzüberschreitenden NZB-Transporten enthalten ist (*«NCBs cross-border transport, cash cycle, per capita and year, 2019/DE»*).

Bei den nationalen Transporten wird des Weiteren unterschieden zwischen Transporten die von der NZB durchgeführt werden (*«NCBs national transport, cash cycle, per capita and year, 2019/DE»*), und Transporten die von WDLs durchgeführt werden (*«CITs national transport, cash cycle, per capita and year, 2019/DE»*).

Innerhalb des NZB-Filialsystems werden die Banknoten mit NZB-Transport-Fahrzeugen transportiert. Banknoten-Transporte erfordern hohe Sicherheitsstandards. Dies beinhaltet den Einsatz von (Polizei-)Begleitfahrzeugen. Von den NZB-Filialen werden die Banknoten dann durch WDL zu den KI-Filialen transportiert und über GAA an die Öffentlichkeit (Verbraucher/ Konsumenten) verteilt. Da es in der EF Datenbank keine Datensätze für gepanzerte Fahrzeuge gibt, wurden diese als «*Articulated lorry*» in verschiedenen Grössen modelliert. Für die Begleitfahrzeuge wurde ein folgender Datensatz genutzt: «*Passenger car, average {GLO} | technology mix, gasoline and diesel driven, Euro 3-5, passenger car | consumption mix, to consumer | engine size from 1,4l up to >2l | LCI result*».

Die aktuelle PEF-Datenbank ermöglicht keine Modifikationen und Parametrisierung von Verkehrsdatensätzen mehr. Daher musste der Auslastungsfaktor (utilisation factor) und die Nutzlast (payload) indirekt an die verschiedenen Szenarien angepasst werden. Die Nutzlast eines Fahrzeugs ist die Fahrzeuglastkapazität, und jeder Datensatz hat je nach Fahrzeugtyp eine Standardnutzlast. Der Auslastungsfaktor stellt das Verhältnis der transportierten Fracht zur Gesamtnutzlast dar. Der Standardwert für den Auslastungsfaktor beträgt in EF-Datensätzen 64%.

Hinsichtlich der Transport-Modellierung werden gemäß der EZB-PEF-Studie folgende Annahmen und Einschränkungen getroffen:

- Nationale und grenzüberschreitende NZB-Transporte: Alle «*articulated lorries*» haben einen Auslastungsfaktor von 45% und die Standard-Nutzlast (nationale NZB-Transporte: 9.3 t und grenzüberschreitende NZB-Transporte: 17.3 t).
- Nationale WDL-Transporte: Alle WDL «*articulated lorries*» haben einen Auslastungsfaktor von 30% und eine Nutzlast von 1.5 t.
- Folgende Aspekte werden nicht berücksichtigt (siehe Kapitel 3.1.):
 - Pkw-Transporte von Banknoten durch den Einzelhandel

In der Version 2.0 der EF-Datenbank war die Anpassung des Nutzungsgrades für Transportdatensätze noch möglich. In der aktuellen Version der EF-Datenbank wird für die Verkehrsdatensätze ein fester Nutzungsgrad von 64 % verwendet. Der Nutzungsgrad wirkt sich direkt auf den Dieserverbrauch und die Verbrennungsemissionen aus. Um einen Anpassungsfaktor für diese Datensätze zu berechnen, wurden die Ergebnisse sowohl für den Nutzungsgrad von 64 % (wie in der aktuellen Version verwendet) als auch für den gewünschten Nutzungsgrad für diese Studie mit den parametrisierten Datensätzen der Version 2.0 berechnet. Für jeden Umweltindikator wurden die Ergebnisse bei der gewünschten Auslastung durch die Ergebnisse bei der 64 %-igen Auslastung geteilt, um den Anpassungsfaktor zu ermitteln. Die Varianz zwischen den verschiedenen Indikatoren war gering: Für Fahrzeuge der Kategorie 12-14 t lag der Faktor für jeden Indikator bei 1,4, für die Kategorie 16-20 t zwischen 1,3 und 1,5 und für Fahrzeuge unter 7,5 t zwischen 4,5 und 4,7. In allen Fällen wurde der Faktor für den Indikator Klimawandel als repräsentativer Anpassungsfaktor gewählt, um die Ergebnisse pro tkm der aktuellen Version der Datenbank zu korrigieren.

Um die abweichende Nutzlast und den Auslastungsfaktor zu berücksichtigen, wurden zunächst die betroffenen Datensätze in der alten Version der EF Datenbank mit den verschiedenen Auslastungen und der Standardauslastung von 64 % berechnet. Bei dem nationalen WDL-Transport wurde ausserdem ebenfalls die Nutzlast von 1.5 t mit parametrisiert. Mit den unterschiedlichen Ergebnissen wurde dann ein Faktor berechnet, welcher auf den Input der aktuellen Datensätze angewendet wurde. Um beim «*articulated lorry*» von 12-14 t und 20-26 t eine Auslastung von nur 45 % statt 64 % zu berücksichtigen, wurde somit die Transportdistanz um ca. 1.4 erhöht. Beim «*articulated lorry*» von <7.5t wird eine Auslastung von 30 % statt 64 % angenommen, und die Nutzlast beträgt 1.5t statt 3.3 t. Dies wurde hier mit einem Faktor von ca. 4.7 berücksichtigt.

4.4.2 Stromverbrauch für Geldausgabeautomaten

Banknoten, die für Barzahlungen verwendet werden, werden an die Verbraucher/ Konsumenten hauptsächlich über GAA sowie über KI-Schalter und Einzelhändler verteilt. Das GAA-Netzwerk wird in der Regel von KI betrieben. Die Verbraucher/ Konsumenten entnehmen Banknoten aus dem GAA mit ihren Bankkarten. Die Modellierungsoptionen für die GAA gemäß EZB-PEF-Studie wurden verwendet und an die aktuelle Studie angepasst:

- Der GAA-Stromverbrauch wird berechnet, indem die GAA-Gesamtzahl mit dem durchschnittlichen jährlichen Verbrauch eines GAA multipliziert und anschließend durch die Gesamtzahl der Personen über 18 Jahre in Deutschland dividiert wird.
- Der durchschnittliche jährliche Verbrauch eines GAA basiert auf dem kombinierten Stromverbrauch für den Inaktivitäts- und den Betriebsmodus (20 kWh pro Woche bei 52 Wochen/Jahr).¹² Der jährliche Stromverbrauch eines GAA beträgt 1'040 kWh.
- Im Jahr 2019 gab es in Deutschland rund 59'000 GAAs. Insgesamt ergibt sich daraus ein Stromverbrauch in Höhe von rund 61'400 MWh. Für „back-office“-Systeme ergab sich ein Stromverbrauch von rund 4'100 MWh.
- Der für die Modellierung des GAA-Energieverbrauchs in der Verteilungsstufe verwendete Datensatz „Strom“ lautet (gem. EZB-PEF-Studie): *Electricity grid mix 1kV-60kV {DE} | technology mix | consumption mix, to consumer | 1kV - 60kV | LCI result*». Diese Energie wird als Konsumenten-Verbrauch betrachtet und daher auch als der für die Nutzungsstufe erforderliche Datensatz (gem. PEF-Methode) verwendet. Dieser Datensatz enthält eine Mischung aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Quellen.
- Der EU 28 Konvertierungsdatensatz für mittlere Stromspannung in Niederspannung wurde verwendet, welcher einen durchschnittlichen Stromverlust für Europa von 2.29% annimmt.
- Die Rohstoffe und die Herstellung von GAA werden nicht berücksichtigt, da sie als Investitionsgüter gelten.

4.4.3 Energie für Bearbeitungstätigkeiten bei der NZB, den WDL und KI

Die für Bearbeitungstätigkeiten benötigte Energie bei der NZB, den WDL und KI wurde ebenfalls in dieser Studie berücksichtigt. Diese Energie beinhaltet die Echtheitsprüfung und Umlaufprüfung der Banknoten durch Banknotenbearbeitungsmaschinen und alles, was an Energie/Wärme, die in Gebäuden genutzt wird, den Banknoten zuzuordnen ist. Werden nicht-umlauffähige Banknoten bei der NZB-Prüfung identifiziert, werden diese direkt in derselben Maschine geschreddert. Dieser Energieaufwand ist hier ebenfalls enthalten.

Die Energieverbräuche wurden bei der Datenerhebung in verschiedene Energieträger unterteilt. Um die spätere Parametrisierung für die Sensitivitätsanalyse zu erleichtern, wurde ein Datensatz erstellt, der genau diesen Strommix abbildet («*Electricity mix, kWh*»). Die genaue Zusammensetzung kann in Tab. 4.2 gesehen werden. Auf diesen Datensatz wurde dann der Konvertierungsdatensatz für mittlere Stromspannung in Niederspannung angewendet, welcher einen durchschnittlichen Verlust für Europa von 2.29% annimmt.

¹² Betriebsmodus: 1 Stunde; Inaktivitätsmodus: 23 Stunden; Verfügbarkeit 24 Stunden/ 7 Tage

Tab. 4.2 Anteile der verschiedenen Energieträger für den Strommix in dieser Studie laut Fragebögen

Energieträger	Anteil
(Standard) Strommix	17.1%
Strom aus öffentlichem Netz: Biomasse	11.7%
Strom aus öffentlichem Netz: Fossile Brennstoffe (unspezifiziert)	0.3%
Strom aus öffentlichem Netz: Wasserkraft	4.8%
Strom aus öffentlichem Netz: Erdgas	2.4%
Strom aus öffentlichem Netz: Kernenergie	5.3%
Strom aus öffentlichem Netz: Photovoltaik	12.4%
Strom aus öffentlichem Netz: Windenergie	22.4%
Eigene Stromerzeugung aus Windenergie	9.4%
Strom aus öffentlichem Netz: Steinkohle	14.2%

Bei der thermischen Energie werden ebenfalls verschiedene Erzeugungsmethoden genutzt. Um diese besser analysieren zu können und eine spätere Parametrisierung zu erleichtern wurde ein «*Thermal energy mix, MJ*» Datensatz erstellt. Dort enthalten sind thermische Energie aus Schweröl (38%), Erdgas (46%) und Fernwärme (16%). Da es in der EF-Datenbank keinen Datensatz für Fernwärme gibt, wurde hier ebenfalls der Datensatz für thermische Energie aus Erdgas verwendet, da dieser den höchsten Anteil in Deutschland ausmacht im Jahr 2018¹³, und die genaue Zusammensetzung der Fernwärme der Bundesbank nicht ermittelt werden konnte.

4.4.4 Materialien und Materialentsorgung

Bei den Materialien handelt es sich mehrheitlich um Verpackungsmaterialien für die transportierten Banknoten. Viele der Verpackungen werden von Externen an die Deutsche Bundesbank angeliefert und waren daher in den erhobenen Daten, nur in der Entsorgung enthalten, jedoch nicht in den Input-Materialien. Um die Massenbilanz aufrecht zu erhalten, werden die Materialien inputseitig als auch outputseitig berücksichtigt. D.h. wenn die recycelte Menge höher ist als die eingekaufte Menge, wird erste auch als Materialinput bilanziert, und andersherum ebenso.

Da für den Wasserverbrauch keine Entsorgung angegeben wurde, wurde diese zusätzlich als «*Treatment of residential wastewater, large plant {EU+EFTA+UK} | waste water treatment including sludge treatment | production mix, at plant | 1m3 of waste water treated | LCI result*» modelliert. Die Aluminiumverpackungen wurden ausserdem als «Aluminium Tray» modelliert, da dieser Datensatz vergleichbare Verarbeitungsschritte und dieselben Materialien beinhaltet.

Es wird angenommen, dass alle verwendeten Materialien zu 100% recycelt werden. Es handelt sich dabei um Aluminium, Plastik, Papier/Karton und Holz. Hierbei wurde die Circular Footprint Formel angewendet, daher wurde jedem Material zwei Datensätze zugeteilt: einmal ein Datensatz für das Recycling und ein Datensatz für das zu ersetzende Material, um die Gutschrift, welche bei dieser Methode gewährt wird, zu berücksichtigen. Eine genaue Beschreibung der Circular Footprint Formel ist in Anhang B zu finden.

4.5 Nutzung

Wenn Verbraucher/ Konsumenten am POS mit Banknoten bezahlen, werden bei der Annahme von Banknoten Authentifizierungsprüfungen durch das Kassenpersonal durchgeführt. Diese Prüfungen werden teilweise auch mit Banknotenprüfgeräten (Banknote Authentication Devices/ BAD) oder mit

¹³ [Fernwärme Informationen - Was ist Fernwärme - Daten & Fakten Fernwärme](#)

Banknoten-Modulen in Self-Checkout-Terminals (SCoT) durchgeführt. Die für diese Geräte benötigte Energie wird in die Nutzungsphase einbezogen.

Die wichtigsten Festlegungen für die Modellierung gemäß EZB-PEF-Studie werden nachfolgend aufgelistet:

- Der für die Modellierung der Nutzungsstufe verwendete Stromdatensatz lautet (gem. EZB-PEF-Studie): “ *Electricity grid mix 1kV-60kV {DE} | technology mix | consumption mix, to consumer | 1kV - 60kV | LCI result* “. Er wird verwendet, weil die PEF-Methode besagt, dass der „consumption grid mix“ für die Nutzungsphase verwendet werden soll. Dieser Datensatz enthält eine Mischung aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Quellen.
- Der EU 28 Konvertierungsdatensatz für mittlere Stromspannung in Niederspannung wurde hier ebenfalls verwendet, welcher einen durchschnittlichen Verlust für Europa von 2.29% annimmt.
- Die Energiedaten für die Echtheitsprüfung von Banknoten werden aus dem Stromverbrauch für Banknotenprüfgeräte am POS und für Banknoten-Module in Self-Checkout-Terminals (SCoT) gewonnen.
- Es wird geschätzt, dass der jährliche Stromverbrauch von Banknotenprüfgeräten 34.32 kWh beträgt bei einem Verbrauch von 10 W und einer Nutzung von 11 Stunden pro Tag, für 6 Tage pro Woche und 52 Wochen pro Jahr.
- Es wird angenommen, dass der durchschnittliche jährliche Verbrauch von SCoT (nur Banknoten-Modul) 15 kWh beträgt.
- Die Summe aus dem Stromverbrauch für Banknotenprüfgeräte und dem Stromverbrauch für SCoT (nur Banknoten-Modul) ergibt den gesamten Stromverbrauch in der Nutzungsphase in einem Jahr, welcher dann durch die Anzahl der Personen über 18 Jahre in Deutschland dividiert wird, um den Verbrauch je funktionelle Einheit zu erhalten.
- Andere am POS eingesetzte Maschinen (Kassen, Förderbänder, Scanner etc.) stehen nicht in engem Zusammenhang mit dem Transaktionsakt, sondern mit anderen Geschäftsaktivitäten (wie beispielsweise der Buchführung) und werden daher von der Berechnung ausgeschlossen, da sie außerhalb des Untersuchungsbereichs liegen.
- Die Rohstoffe und die Herstellung von Authentifizierungsmaschinen werden ausgeschlossen, da sie als Investitionsgüter gelten.
- Die Herstellung von Geldbörsen wird ebenfalls ausgeschlossen, da sie für unterschiedliche Zwecke und nicht nur für Banknoten verwendet werden.

Einzelheiten zu den (Schätz-)Werten für Handel und Bewirtung sind der Tab. 4.3 zu entnehmen.

Tab. 4.3 Fragebogen zu Stromverbrauch „Handel und Bewirtung 2019“ und Self-Checkout Terminals

Fragebogen „Handel und Bewirtung“	(Schätz-) Werte	Anmerkungen
Anzahl Betriebe: Handel und Bewirtung	700'300	535'300 (Handel) 165'000 (Bewirtung)
Anzahl POS	1'200'500	986'000 (Kassen im Handel) 214'500 (Kassen Bewirtung: ca. 1.3 Kassen pro Betrieb)
POS mit Banknoten-Prüfgeräte (Banknote Authentication Device/ BAD)	207'925	Handel: 20% (197'200 BAD) Bewirtung: 5% (10'725 BAD) Insgesamt: 207'925 BAD
Geschätzter Stromverbrauch/ BAD in Wh	34'320	EZB: 10 W x 11 Stunden x 6 Tage/ Woche x 52 Wochen/ Jahr (2019)
Total Stromverbrauch für Handel und Bewirtung (kWh)	7'135'986	
Anzahl Self-Checkout Terminals (SCoT)	4'760	
SCoTs mit Banknotenmodul (in %)	50%	Nicht alle SCoT sind mit Barzahlungsfunktion ausgestattet
Geschätzter Stromverbrauch/ SCoT in kWh (nur BanknotenModul)	15	EZB: 15 kWh/ Jahr
Gesamter Stromverbrauch für SCoT (kWh)	35'700	Nur SCoT mit Banknoten-Modul

4.6 Entsorgung

Nicht mehr für den Bargeldkreislauf umlauffähige Geldscheine werden geschreddert und anschließend entsorgt. Laut der Daten der Bundesbank werden diese zu 100% mit Energierückgewinnung verbrannt. Die Entsorgungsphase enthält lediglich die Verbrennung der geschredderten Banknoten und deren Transport dort hin. Die Verbrennung wurde mit folgendem Datensatz modelliert: «*Waste incineration of textile, animal and plant based {DE} | waste-to-energy plant with dry flue gas treatment, including transport and pre-treatment | production mix, at consumer | textile waste | LCI result*». Der Energieaufwand für das Schreddern der Banknoten ist bereits im Teil «*Energy for other processing activities at NCBs, CITs, Cis, cash cycle, per capita and year, 2019/DE*» enthalten und kann nicht separiert werden, da das Schreddern automatisch nach der Echtheits- und Umlauffähigkeitsprüfung in derselben Maschine geschieht.

Auffällig ist, dass im End-of-Life (EoL) eine negative Umweltwirkung ausgewiesen wird. Dies liegt daran, dass durch die Verbrennung mit Energierückgewinnung sogenannte "credits" vergeben werden, die die verursachten Emissionen übersteigen. Der Grund dafür ist, dass die Banknoten biogenen Kohlenstoff (non-fossil carbon) enthalten. Bei der Verbrennung von biogenem Material wird das dabei freigesetzte CO₂ nicht in der Klimawirkung bilanziert, da es zuvor beim Wachstum der verwendeten pflanzlichen Rohstoffe aus der Atmosphäre aufgenommen wurde. Da der Single Score zu einem erheblichen Teil auf der Kategorie Climate Change basiert, kann dieser Effekt zu einem rechnerisch negativen Umwelteinfluss führen – auch wenn dieser nur einen sehr kleinen, in der Gesamtschau vernachlässigbaren Anteil darstellt.

4.7 Datenqualität

Die Datenqualität jedes EF konformen Datensatzes, welcher in dieser Studie genutzt wurde, ist in Tab. 4.4 zu finden. Für die zeitliche Repräsentativität wurde als Referenzjahr 2019 angenommen. Die Datensätze aus der EF-Datenbank haben alle als Referenzjahr 2012 und sind somit älter als 6 Jahre. Die zeitliche Repräsentativität ist somit schlecht. Insbesondere für den Strommix in Deutschland und

die Versorgung mit fossilen Kraft- und Brennstoffen gab es in der Zwischenzeit wesentliche Veränderungen durch die Steigerung der erneuerbaren Energien, Ausstieg aus der Atomkraft und Änderungen der Lieferketten wegen des Angriffs Russlands auf die Ukraine.

Der verwendete Stromdatensatz «consumption mix» für Deutschland der EF 3.1 Datenbank wurde daher mit aktuelleren Datensätzen der ESU Datenbank von 2023 und Ecoinvent von 2021 in der Fig. 4.1 verglichen. Der Gesamtpunktwert für den EF Datensatz ist etwas niedriger als für die anderen, jedoch liegen die Werte relativ nah beieinander.

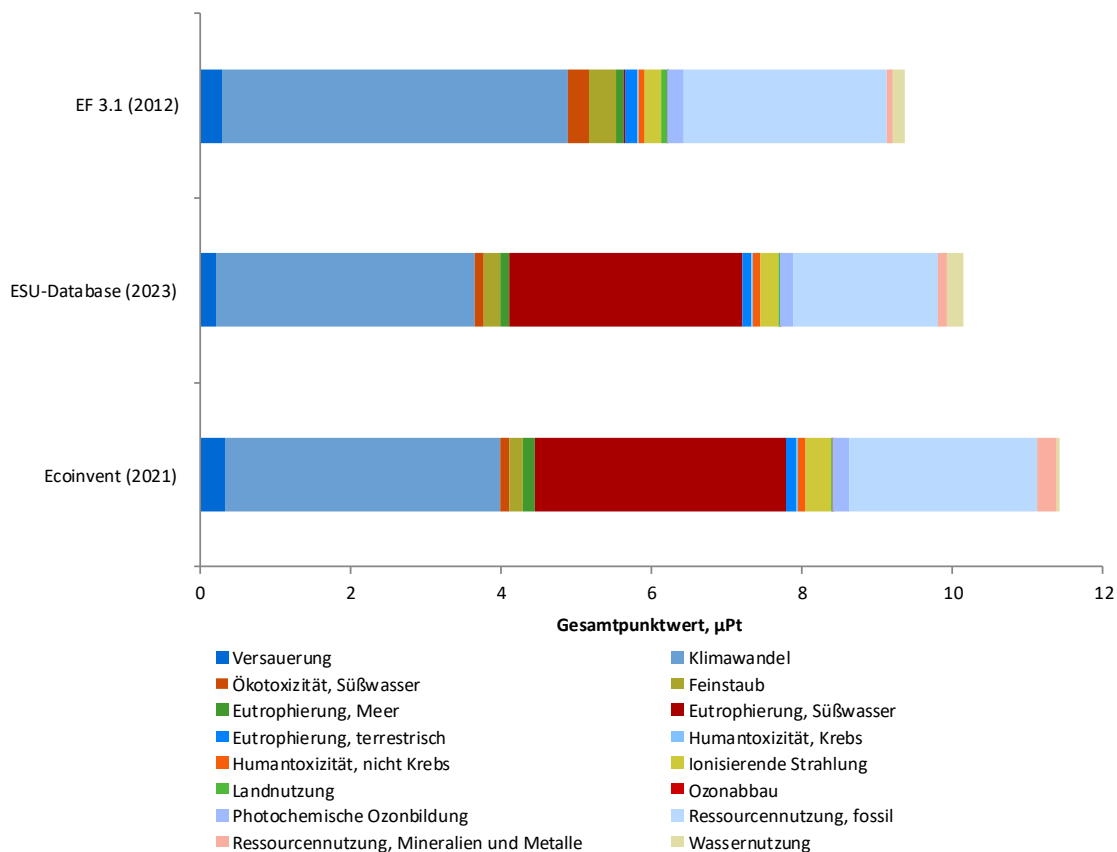


Fig. 4.1 Vergleich der Stromdatensätze aus der EF 3.1 (2012), der ESU (2023) und der Ecoinvent 3 (2021) Datenbank

Für die geographische Repräsentativität wird Deutschland als Referenz angenommen.

Da es keine Datensätze für gepanzerte Fahrzeuge in der EF-Datenbank gibt, wurden diese als «*articulated lorries*» modelliert, und haben somit eine geringere technologische Repräsentativität. Ausserdem wurden die Aluminiumverpackungen mit dem Datensatz «*Aluminium tray*» modelliert, welcher vergleichbare Verarbeitungsschritte und dasselbe Material beinhaltet.

Für das Lebensende von Banknoten gibt es ebenfalls keinen Datensatz, weshalb auf folgenden Datensatz ausgewichen werden musste: «*Waste incineration of textile, animal and plant based {DE} | waste-to-energy plant with dry flue gas treatment, including transport and pre-treatment | production mix, at consumer | textile waste | LCI result*».

Für manche Verpackungsmaterialien gibt es neuere Datensätze in der EF 3.1 Datenbank als jene die hier in der Studie verwendet wurden. Jedoch enthalten diese Dummy Prozesse, für welche es in der EF Datenbank noch keine passenden Datensätze gibt, und diese somit nicht brauchbar macht.

Ein weiterer Aspekt ist die generelle Qualität der Datensätze in der EF Datenbank. Diese sind teilweise unvollständig und enthalten leere Dummy Datensätze. Diese müssen durch die Verwender abgeschätzt werden, was zu Inkonsistenzen führen kann. Ausserdem ist kaum kontrollierbar welche Unterschätzungen dadurch bei der Bilanzierung entstehen, wenn diese Dummy Datensätze fehlen.

Ein offensichtlicher Fehler in den Hintergrunddatensätzen zu Elektrofahrzeugen wurde durch die Autoren korrigiert.

Bisher ist unklar, wann eine vollständige und konsistente Datenbank durch die EU zur Verfügung gestellt werden kann. Wir würden aus Sicht der Datenqualität eher die ecoinvent Datenbank oder eine andere Datenbank vergleichbarer Qualität und Transparenz für solche Projekte empfehlen.

Tab. 4.4 Datenqualität der verschiedenen Datensätze (1 – sehr gut bis 5 grobe Schätzung)

Datensatz	Technologische Repräsentativität	Geographische Repräsentativität	Zeitliche Repräsentativität	Präzision	Durchschnitt
Articulated lorry transport, Euro 5, Total weight 12-14 t {EU+EFTA+UK} diesel driven, Euro 5, cargo consumption mix, to consumer 12-14t gross weight / 9,3t payload capacity LCI result	4	2	5	2	3.67
Passenger car, average {GLO} technology mix, gasoline and diesel driven, Euro 3-5, passenger car consumption mix, to consumer engine size from 1,4l up to >2l LCI result	1	3	5	2	3.00
Cargo plane {GLO} technology mix, kerosene driven, cargo consumption mix, to consumer 65 t payload LCI result	1	3	5	2	3.00
Articulated lorry transport, Euro 5, Total weight <7.5 t {EU+EFTA+UK} diesel driven, Euro 5, cargo consumption mix, to consumer up to 7,5t gross weight / 3,3t payload capacity LCI result	4	2	5	2	3.67
Articulated lorry transport, Euro 5, Total weight 20-26 t {EU+EFTA+UK} diesel driven, Euro 5, cargo consumption mix, to consumer 20 - 26t gross weight / 17,3t payload capacity LCI result	4	2	5	2	3.67
Electricity grid mix 1kV-60kV {DE} technology mix consumption mix, to consumer 1kV - 60kV LCI result	2	1	5	2	2.33
Thermal energy mix, MJ	2	2	5	2	2.67
Carton board {EU+EFTA+UK} Kraft Pulping Process, pulp pressing and drying, box manufacturing production mix, at plant 280 g/m ² LCI result	1	2	5	2	2.67
Pallet, wood (80x120) {EU+EFTA+UK} sawing, piling, nailing single route, at plant 25 kg/piece, nominal loading capacity of 1000kg LCI result	1	2	5	2	2.67
Plastic film, PE wrap {EU+EFTA+UK} raw material production, plastic extrusion production mix, at plant thickness: 25 um, grammage: 0,023575 kg/m ² LCI result	1	2	5	2	2.67
Label, OPP {EU+EFTA+UK} PP extrusion and stretching, label production production mix, at plant thickness: 100 um, grammage: 0,0915 kg/m ² LCI result	1	2	5	2	2.67
Tap water {EU+EFTA+UK} average technology mix consumption mix, at consumer Technology mix for supply of drinking water to users LCI result	1	2	5	2	2.67
Aluminium tray {EU+EFTA+UK} primary aluminium production, processing of foil/ tray production mix, at plant 2.7 g/cm ³ LCI result	2	2	5	2	3.00
Recycling of aluminium into aluminium ingot - from post-consumer {EU+EFTA+UK} collection, transport, pretreatment, remelting production mix, at plant aluminium waste, efficiency 90% LCI result	1	2	5	2	2.67
Aluminium ingot mix (high purity) {EU+EFTA+UK} primary production, aluminium casting single route, at plant 2.7 g/cm ³ , >99% Al LCI result	1	2	5	2	2.67
Plastic granulate secondary, PE {EU+EFTA+UK} from post-consumer waste, via washing, granulation, pelletization production mix, at plant 90% recycling rate LCI result	1	2	5	2	2.67
PE granulates {EU+EFTA+UK} Polymerisation of ethylene production mix, at plant 0.91- 0.96 g/cm ³ , 28 g/mol per repeating unit LCI result	1	2	5	2	2.67
Bleached kraft pulp, softwood {EU+EFTA+UK} technology mix production mix, at plant dry mass 0.9, carbon content, non-fossil 0.494 LCI result	1	2	5	2	2.67

Datensatz	Technologische Repräsentativität	Geographische Repräsentativität	Zeitliche Repräsentativität	Präzision	Durchschnitt
Treatment of residential wastewater, large plant {EU+EFTA+UK} waste water treatment including sludge treatment production mix, at plant 1m3 of waste water treated LCI result	1	2	5	2	2.67
Chips production {EU+EFTA+UK} service production mix, at plant service, for 1 kg of output LCI result	1	2	5	2	2.67
Wood residues, hardwood {EU+EFTA+UK} technology mix production mix, at forest measured as dry mass LCI result	1	2	5	2	2.67
Articulated lorry transport, Euro 5, Total weight >32 t {EU+EFTA+UK} diesel driven, Euro 5, cargo consumption mix, to consumer more than 32t gross weight / 24,7t payload capacity LCI result	4	2	5	2	3.67
Waste incineration of textile, animal and plant based {DE} waste-to-energy plant with dry flue gas treatment, including transport and pre-treatment production mix, at consumer textile waste LCI result	3	1	5	2	2.33

5 Auswertung (Environmental Footprint Reporting)

Nach Zusammenstellung der Sachbilanz erfolgt in diesem Kapitel die Bewertung der Umweltbelastungen (Life Cycle Impact Assessment/ LCIA), um den Umwelteinfluss des Produkts zu berechnen.

Die Lebenszyklus-Folgenabschätzung beinhaltet vier Stufen (siehe Fig. 5.1):

- **Klassifikation:** Die in der Sachbilanz gesammelten Flüsse werden den Wirkungskategorien zugewiesen.
- **Charakterisierung:** Berechnung der Größenordnung des Beitrags eines jeden Flusses zu der jeweiligen Wirkungskategorie und Aggregation aller Beiträge innerhalb einer Kategorie.
- **Normierung:** Multiplikation der charakterisierten Ergebnisse mit Normierungsfaktoren gem. PEF-Methode, um die Ergebnisse der verschiedenen Wirkungskategorien in der gleichen Referenzeinheit auszudrücken.
- **Gewichtung:** Die normalisierten Ergebnisse werden mit einem Satz an vorgegebenen Gewichtungsfaktoren gem. PEF-Methode multipliziert, die die wahrgenommene relative Wichtigkeit der Wirkungskategorien widerspiegeln.

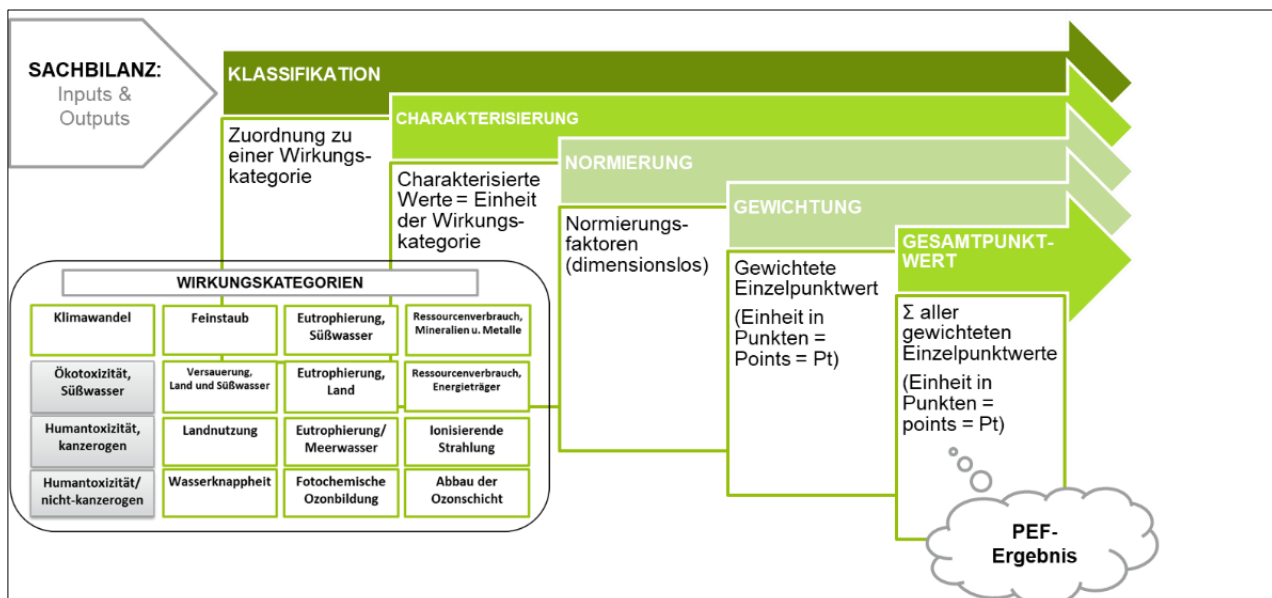


Fig. 5.1 Stufen der Bewertung von Umweltbelastungen (vereinfachte Darstellung)

Zunächst wird das Gesamtergebnis (der Gesamtpunktwert) dargestellt, dann erfolgt eine Aufschlüsselung nach Lebenszyklus-Stufen und Aktivitäten/ Prozessen einschließlich einer Interpretation der Ergebnisse. Die folgenden Kapitel beschreiben einzelne Darstellungen im Detail.

5.1 Überblick

Tab. 5.1 zeigt die Darstellung des für die PEF-Studie berechneten ökologischen Fußabdrucks bezogen auf die funktionelle Einheit, ausgedrückt auf der Ebene der Charakterisierung, der Normierung und des gewichteten Beitrags des gesamten Fußabdrucks. Die gesamte potenzielle Umweltbelastung eines durchschnittlichen jährlichen Barzahlungswerts pro Person im Jahr 2019 betrug ca. 80 μ Pt und ergab ein GWP von 1.26 kg CO₂-eq.

Tab. 5.1 Umweltbelastung des Bargeldkreislaufs für die durchschnittlichen jährlichen Barzahlungen einer Person im Jahr 2019

Schadenskategorie	Charakterisierung		Normalisierung	Gewichtung	
	Wert	Wert	Score	Beitrag	
	Einheit	-	-	µPt	%
Summe	-	-	-	80.53	100%
Versauerung	mol H+ eq	3.04E-03	5.48E-05	3.40	4%
Klimawandel	kg CO2 eq	1.26E+00	1.67E-04	35.19	44%
Ökotoxizität, Süßwasser	CTUe	8.08E+00	1.42E-04	2.73	3%
Feinstaub	disease inc.	2.49E-08	4.18E-05	3.75	5%
Eutrophierung, Meer	kg N eq	1.01E-03	5.16E-05	1.53	2%
Eutrophierung, Süßwasser	kg P eq	7.56E-06	4.70E-06	0.13	0%
Eutrophierung, terrestrisch	mol N eq	1.08E-02	6.13E-05	2.27	3%
Humantoxizität, Krebs	CTUh	3.29E-10	1.91E-05	0.41	1%
Humantoxizität, nicht Krebs	CTUh	5.96E-09	4.63E-05	0.85	1%
Ionisierende Strahlung	kBq U-235 eq	8.84E-02	2.10E-05	1.05	1%
Landnutzung	Pt	1.99E+01	2.43E-05	1.93	2%
Ozonabbau	kg CFC11 eq	5.01E-10	9.57E-09	0.00	0%
Photochemische Ozonbildung	kg NMVOC eq	2.35E-03	5.76E-05	2.75	3%
Ressourcennutzung, fossil	MJ	1.74E+01	2.68E-04	22.26	28%
Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle	kg Sb eq	9.71E-07	1.53E-05	1.15	1%
Wassernutzung	m3 depriv.	1.52E-01	1.33E-05	1.13	1%

5.2 Charakterisierung

Fig. 5.2 zeigt die relative Aufschlüsselung der Wirkungskategorien für die verschiedenen Lebenszyklusphasen. Es wird deutlich, dass die Verteilungsphase zu allen Kategorien den höchsten Beitrag leistet. Ebenfalls wird ersichtlich, dass die Entsorgungsphase besonders in den Wirkungskategorien «Klimawandel», «Ressourcennutzung, fossil», «Ionisierende Strahlung» einen negativen Einfluss haben.

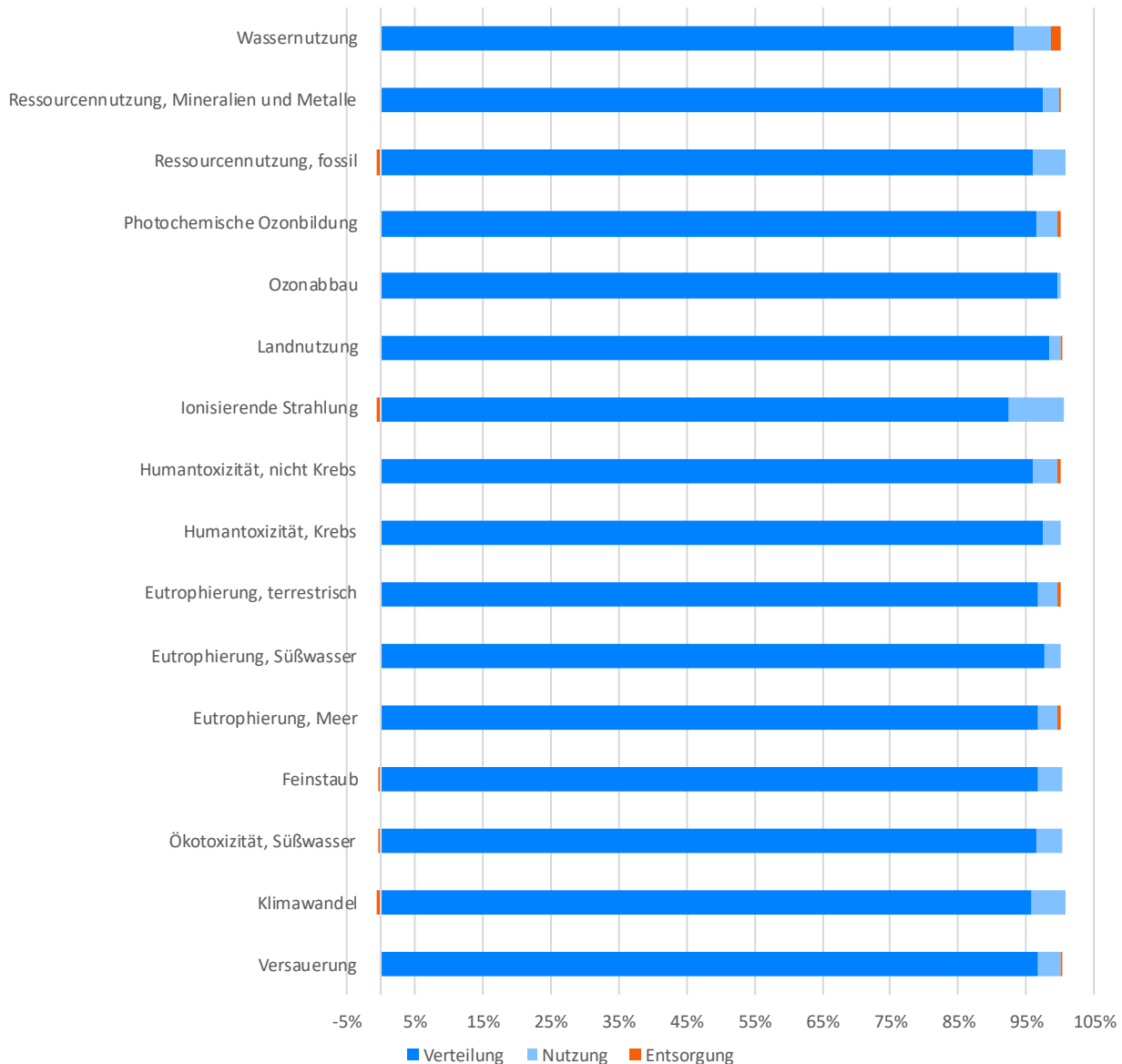


Fig. 5.2: Relative Aufschlüsselung der Wirkungskategorien für die Lebenszyklusphasen.

5.3 Gesamtpunktwert

Der Gesamtpunktwert wird ausgehend von der Zuordnung der Emissionen in die einzelnen Wirkungskategorien und der in ihren Einheiten ausgedrückten Charakterisierung berechnet. Charakterisierte Ergebnisse werden dann auf Basis von PEF-Normierungsfaktoren auf dimensionslose Werte normiert. Jede Wirkungskategorie wird dann gemäß der PEF-Methode gewichtet, sodass gewichtete Einzelpunktwerte in Punkten ausgedrückt werden. Alle gewichteten Einzelpunktwerte je Wirkungskategorie werden addiert, um den Gesamtpunktwert der Studie zu erhalten, der die potenziellen Umweltauswirkungen der durchschnittlichen jährlichen Barzahlungen einer Person im Jahr 2019 darstellt (siehe Kapitel 3.2).

Fig. 5.3 zeigt den prozentualen Beitrag jeder Lebenszyklusphase zum Gesamtpunktwert. Daraus kann man sehen, dass die Verteilungsphase den Hauptteil des Beitrages leistet, wohingegen die Nutzungsphase nur einen sehr kleinen Teil ausmacht. Die Entsorgungsphase hat insgesamt einen negativen Einfluss auf den Gesamtpunktwert.

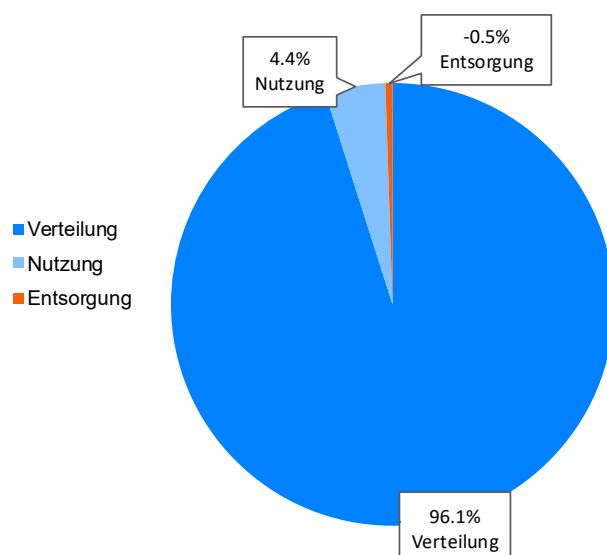


Fig. 5.3 Prozentualer Beitrag jeder Lebenszyklusphase zur einzelnen Gesamtbewertung.

Die gewichteten Ergebnisse für jede Lebenszyklusphase unterteilt in die verschiedenen Schadenskategorien sind in der Fig. 5.4 abgebildet. Es wird erneut deutlich, dass die Verteilungsphase die meisten Belastungspunkte verursacht. Die Schadenskategorien, die hierbei am meisten betroffen sind, sind die Kategorien Wirkungskategorien «*Klimawandel*» und «*Ressourcennutzung, fossil*».

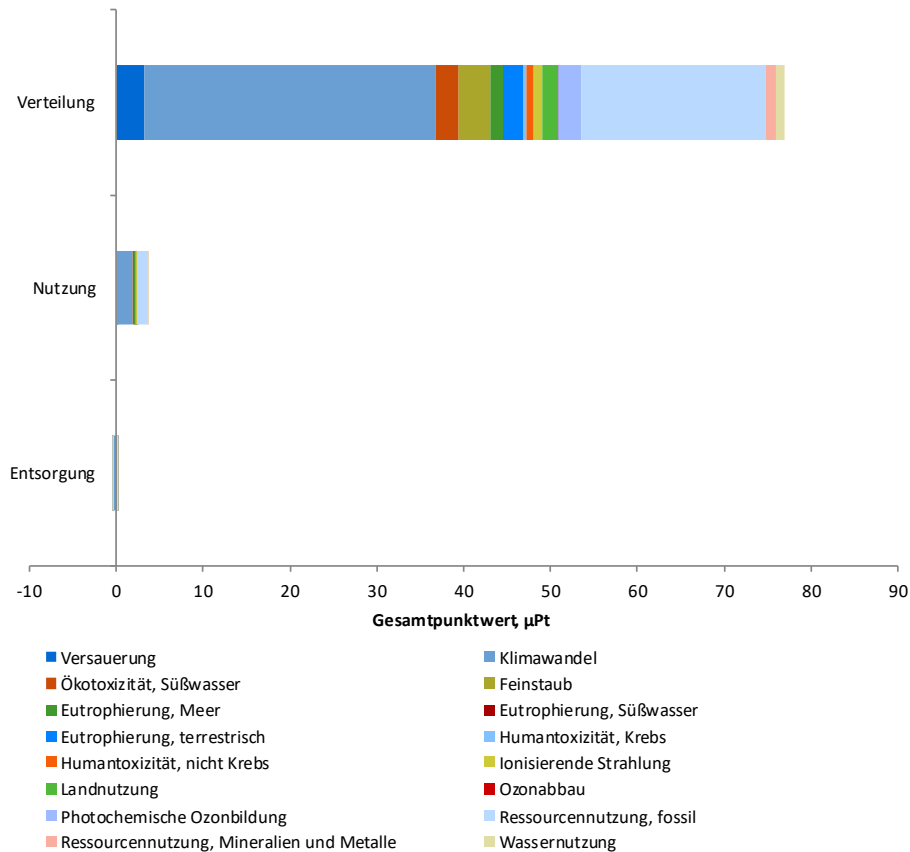


Fig. 5.4: Gewichtete Ergebnisse unterteilt in Lebenszyklusphasen und Wirkungskategorien

Die prozentualen Beiträge der verschiedenen Aktivitäten zum Gesamtpunktwert werden in Fig. 5.5 dargestellt. Der Energieverbrauch für die Geldausgabeautomaten macht fast die Hälfte des Gesamtpunktwerts aus. Ebenfalls einen erheblichen Anteil hat der Transport und die Energie und Materialverbrauch für andere Verarbeitungsaktivitäten. Die Echtheitsprüfung der Geldscheine am POS macht nur einen sehr geringen Anteil aus, und die Entsorgung hat insgesamt einen geringen positiven Abdruck, durch die Erteilung von Gutschriften für zurückgewonnene Energie.

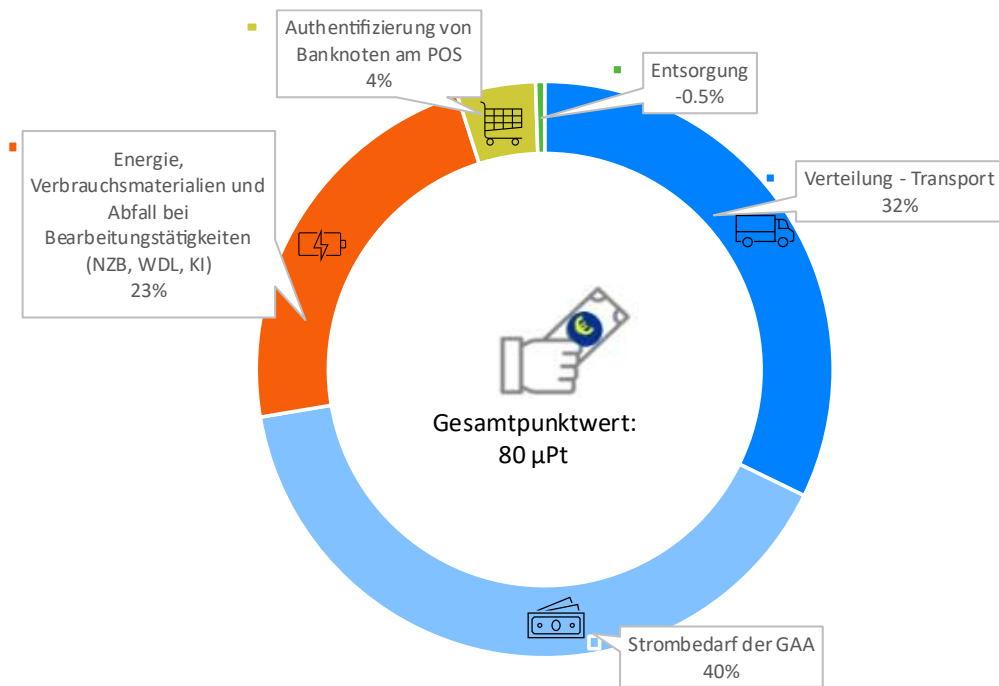


Fig. 5.5 Gesamtumweltbelastung, unterteilt nach Aktivitäten und deren prozentualen Beiträgen.

Fig. 5.6 zeigt den Anteil der verschiedenen Transportphasen für die Gesamtumweltbelastung der Transporte. Dominant sind dabei die nationalen Transporte, insbesondere diese der WDL. Die grenzüberschreitenden NZB-Transporte spielen nur eine sehr geringe Rolle.

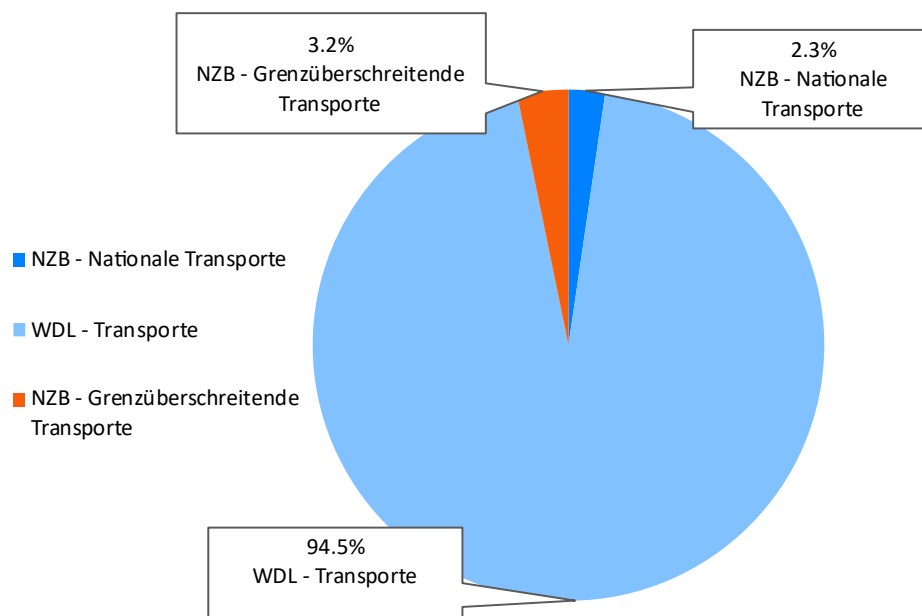


Fig. 5.6: Prozentuelle Beiträge der verschiedenen Transportphasen am Gesamtpunktwert der Transporte

5.4 Liste der wichtigsten Wirkungskategorien und Lebenszyklus-Stufen

Die wichtigsten Wirkungskategorien sind die Wirkungskategorien, die gemäß der PEF-Methode kumuliert mindestens 80% des Gesamtpunktwertes ausmachen. Diese werden in Tab. 5.2 gezeigt. Die vier Wirkungskategorien «Klimawandel», «Ressourcennutzung, fossil», «Feinstaub» und «Versauerung» machen insgesamt 80% des Gesamtpunktwertes aus.

Tab. 5.2 Wichtigsten Wirkungskategorien und ihr Beitrag zum Gesamtpunktwert

Wirkungskategorie	Beitrag zum Gesamtpunktwert		
	µPts	%	%
Total	80.531	100.0%	100%
Klimawandel	35.193	43.7%	80%
Ressourcennutzung, fossil	22.256	27.6%	
Feinstaub	3.745	4.7%	
Versauerung	3.396	4.2%	
Photochemische Ozonbildung	2.754	3.4%	20%
Ökotoxizität, Süßwasser	2.734	3.4%	
Eutrophierung, terrestrisch	2.275	2.8%	
Landnutzung	1.930	2.4%	
Eutrophierung, Meer	1.527	1.9%	
Ionisierende Strahlung	1.050	1.3%	
Wassernutzung	1.129	1.4%	
Humantoxizität, nicht Krebs	0.851	1.1%	
Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle	1.152	1.4%	
Humantoxizität, Krebs	0.406	0.5%	
Eutrophierung, Süßwasser	0.132	0.2%	
Ozonabbau	0.001	0.0%	

Tab. 5.3 zeigt für die wichtigsten Wirkungskategorien wie sich deren Einfluss auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen aufteilen lässt. Nach der PEF-Methode zeigt dies die relevantesten Lebenszyklus-Stufen, welche zusammen mindestens 80% zu den nach der PEF-Methode identifizierten relevantesten Wirkungskategorien beitragen (siehe Tab. 5.2). Da die Verteilungsphase für die untersuchte funktionelle Einheit in jeder Wirkungskategorie über 90% der verursachten Umweltpunkte repräsentiert, ist dies die wichtigste Lebenszyklusphase.

Tab. 5.3 Beiträge der Lebenszyklusstufen zu den wichtigsten Wirkungskategorien

Wirkungskategorie	Verteilung	Nutzung	Entsorgung
	%		
Klimawandel	96%	5.0%	-0.79%
Ressourcennutzung, fossil	96%	4.6%	-0.72%
Feinstaub	97%	3.6%	-0.38%
Versauerung	97%	3.3%	0.04%

Die relevantesten Aktivitäten/ Prozesse sind diejenigen, die zusammen mindestens 80% der relevantesten identifizierten Wirkungskategorien ausmachen. Diese sind in Tab. 5.4 zusammengestellt. Man erkennt, dass die Prozesse für den deutschen «consumption mix» und der «Articulated lorry» mit einem Gewicht <7.5t in allen Wirkungskategorien die dominierenden sind. Etwas geringer, jedoch auch zu jeder Wirkungskategorie tragen die «Thermal energy» aus Erdgas und aus Schweröl bei.

Beim Klimawandel ist Kohlendioxid vor allem aus Verbrennungsprozessen der wichtigste Beitrag. Für die fossile Ressourcennutzung ist die Energie aus Öl und Braunkohle am ausschlaggebendsten. Die Elementarflüsse mit dem grössten Beitrag zur Kategorie Feinstaub sind Partikel, die kleiner als $2.5\mu\text{m}$ sind und Schwefeldioxid. Für die Versauerung sind es ebenfalls Schwefeldioxid, aber auch Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid, die den grössten Beitrag haben.

Tab. 5.4 Aufstellung der relevantesten Prozesse, welche zusammen mindestens 80% der relevantesten Wirkungskategorien ausmachen.

Prozess	Klimawandel	Ressourcennutzung, fossil	Feinstaub	Versauerung
	% Beitrag			
Electricity grid mix 1kV-60kV {DE} technology mix consumption mix, to consumer 1kV - 60kV LCI result	53.1%	49.1%	38.2%	35.1%
Articulated lorry transport, Euro 5, Total weight <7.5 t {EU+EFTA+UK} diesel driven, Euro 5, cargo consumption mix, to consumer up to 7,5t gross weight / 3,3t payload capacity LCI result	26.9%	27.2%	23.4%	37.9%
Thermal energy from natural gas {EU+EFTA+UK} technology mix regarding firing and flue gas cleaning production mix, at heat plant MJ, 100% efficiency LCI result	4.9%	5.8%	-	-
Low density polyethylene (LDPE), fossil fuel-based {GLO} polymerisation of fossil-based ethylene production mix, at plant petrochemical based LCI result	-	-	12.4%	4.9%
Thermal energy from heavy fuel oil (HFO) {EU+EFTA+UK} technology mix regarding firing and flue gas cleaning production mix, at heat plant MJ, 100% efficiency LCI result	-	-	6.6%	6.6%
Summe	84.9%	82.1%	80.7%	84.4%

6 Sensitivitätsanalysen

Es wurden Sensitivitätsanalysen für die verschiedenen Stromverbräuche im Bargeldkreislauf gemacht, da diese den grössten Beitrag zum Gesamtergebnis leisten (siehe Kapitel 5): Für den Stromverbrauch der Geldausgabeautomaten, die Bearbeitungstätigkeit in der Verteilungsphase und der Nutzungsphase. Für alle drei Aktivitäten wurden folgende Berechnungen erstellt:

- 10 oder 50% weniger Energie («consumption mix» oder «electricity mix») als das aktuelle PEF-Modell
- 10 oder 50% mehr Energie («consumption mix» oder «electricity mix») als das aktuelle PEF-Modell

Hierfür wurden Parameter in Excel definiert und mithilfe eines Makros in SimaPro importiert. Die Werte für die Parameter wurden über eine Excel Tabelle direkt in SimaPro eingelesen.

6.1 Stromverbrauch für Geldausgabeautomaten

Die Sensitivitätsanalyse, um zu untersuchen, wie sich der Gesamtpunktwert in Bezug auf die funktionelle Einheit ändert, wenn der Stromverbrauch für GAA variiert werden würde, ist in Fig. 6.1 zu sehen.

Mit einer Reduzierung oder Erhöhung des Stromverbrauchs um 10%, variiert der Gesamtpunktwert um ca. $\pm 4\%$, und eine Variierung um $\pm 50\%$ beeinflusst das Gesamtergebnis um $\pm 20\%$. Die Unsicherheit bei der Bestimmung des Stromverbrauchs hat somit einen gewissen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

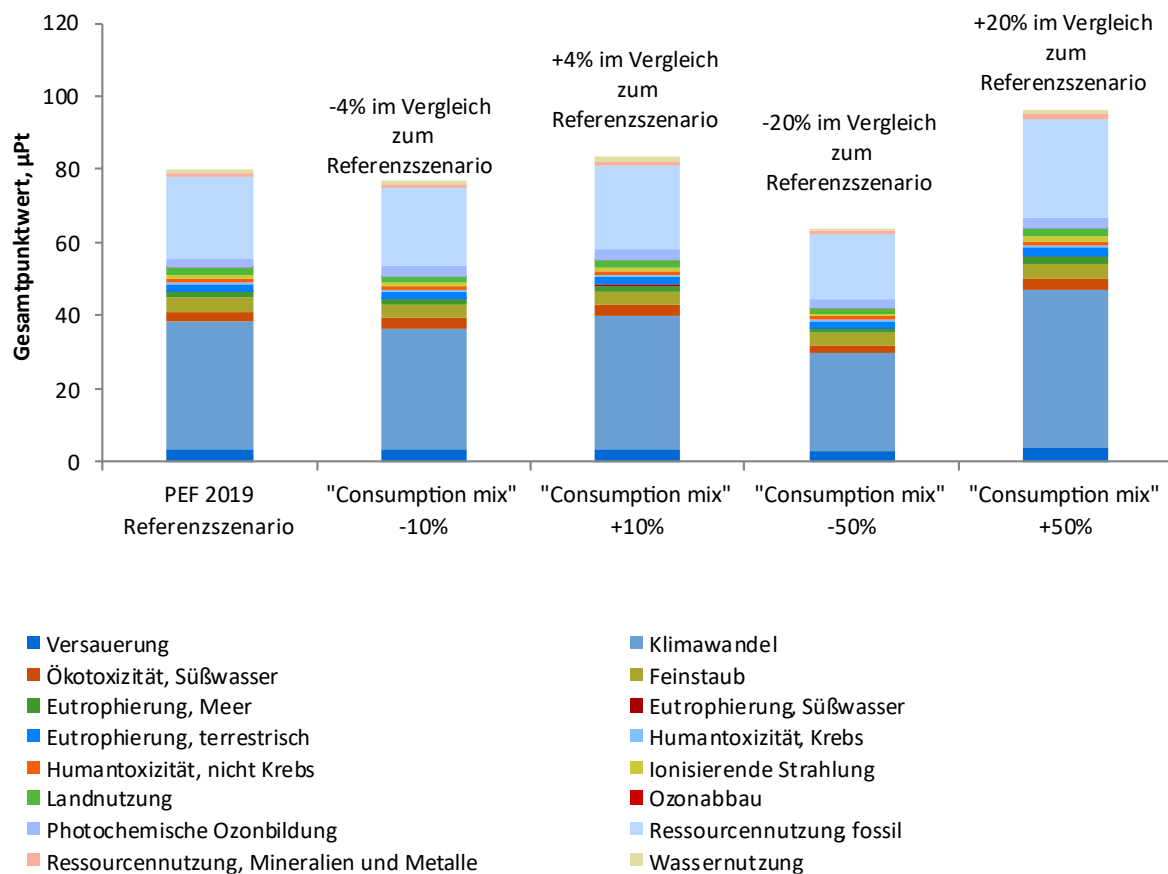


Fig. 6.1 Gesamtpunktwert und Einteilung in Wirkungskategorien für die Variierung des Stromverbrauchs für die Geldausgabeautomaten

6.2 Stromverbrauch für die Bearbeitungstätigkeit in der Verteilungsphase

Die Auswirkungen einer Veränderung des Stromverbrauchs für die Bearbeitungstätigkeit in der Verteilungsphase auf den Gesamtpunktwert bezogen, sind in Fig. 6.2 dargestellt.

Eine Anpassung des Stromverbrauchs um $\pm 10\%$ führt zu einer Veränderung des Gesamtpunktwerts um rund $\pm 1\%$. Bei einer stärkeren Variation von $\pm 50\%$ verändert sich das Gesamtergebnis um etwa $\pm 3\%$. Dies verdeutlicht die mittlere Sensitivität des Modells gegenüber Änderungen zu den Annahmen für den Strombedarf.

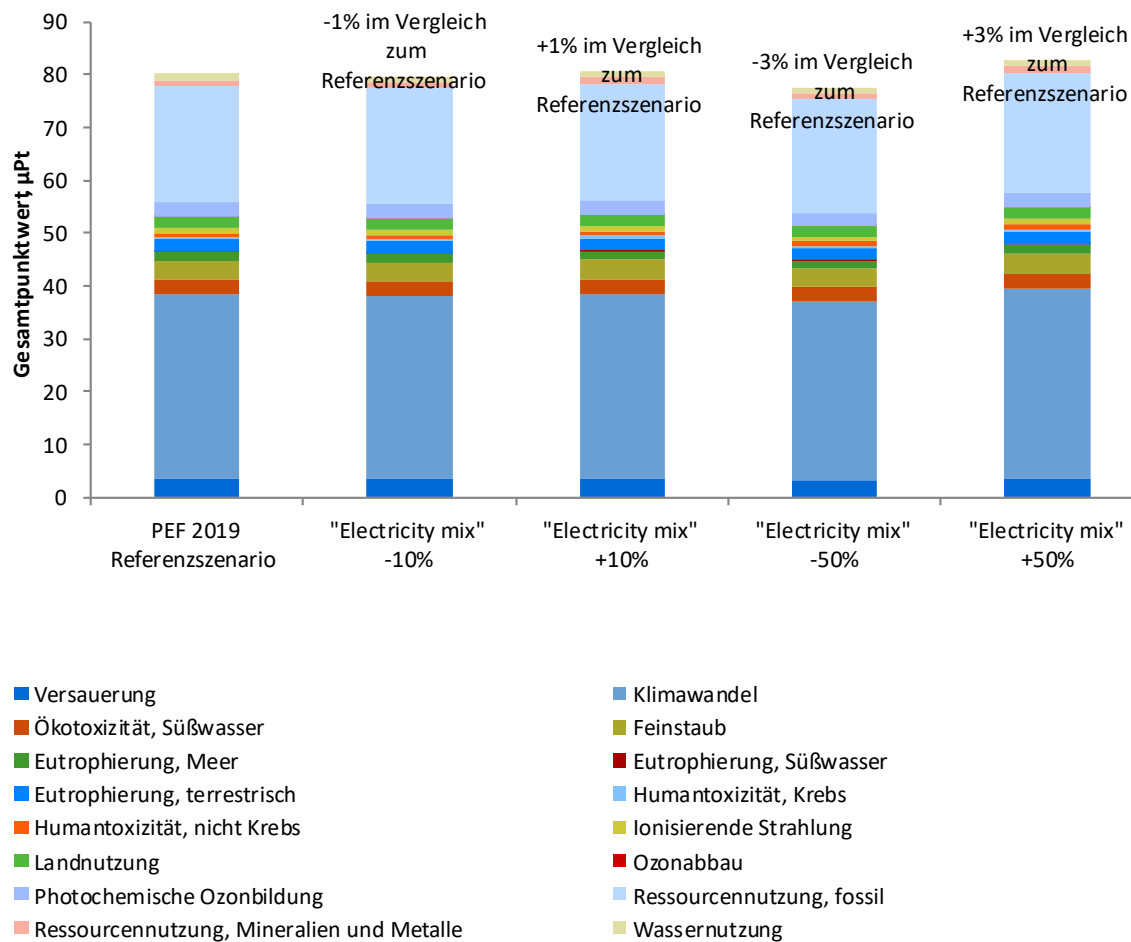


Fig. 6.2 Gesamtpunktwert und Einteilung in Wirkungskategorien für die Variierung des Stromverbrauchs für die Bearbeitungstätigkeit in der Verteilungsphase

6.3 Stromverbrauch in der Nutzungsphase

Fig. 6.3 zeigt die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse zur Veränderung des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase in Bezug auf die funktionelle Einheit.

Eine Reduktion oder Erhöhung des Stromverbrauchs um $\pm 10\%$ führt zu einer Abweichung des Gesamtpunktwerts um etwa $\pm 0.4\%$, während eine Änderung um 50% eine Differenz von rund $\pm 2\%$ im Gesamtergebnis bewirkt. Damit hat auch die Annahme zum Stromverbrauch in der Nutzungsphase eher einen geringen Einfluss.

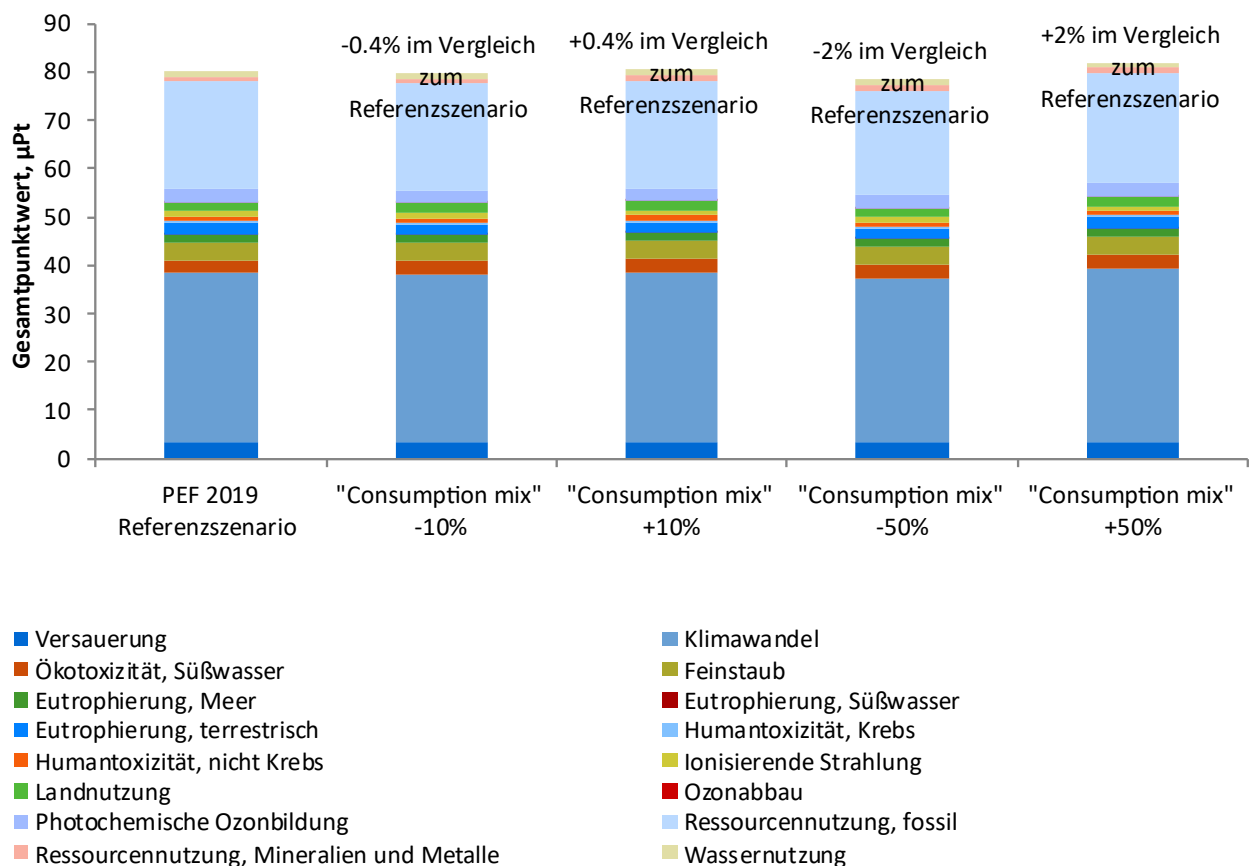


Fig. 6.3 Gesamtpunktwert und Einteilung in Wirkungskategorien für die Variierung des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase

7 Szenarioanalysen

Zusätzlich zu den Sensitivitätsanalysen wurden Szenarioanalysen durchgeführt, um die potenziellen Umweltauswirkungen unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen zu untersuchen. Der Fokus lag hierbei auf den Bereichen Energiebedarf und Transport, da diese den Grossteil der Umweltauswirkungen ausmachen.

Vor dem Hintergrund des anhaltenden Trends hin zu erneuerbaren Energien wurden für die drei ermittelten Stromverbräuche alternative Energiemix-Szenarien modelliert. Dabei kamen unterschiedliche Energiequellen als Stromlieferanten zum Einsatz, um die jeweiligen Gesamtauswirkungen auf das Ergebnis der Studie zu untersuchen.

Im Bereich Transport zeichnet sich zunehmend eine Entwicklung in Richtung Elektromobilität ab. Aus diesem Grund wurden im Rahmen eines Szenarios die Fahrzeuge im nationalen WDL-Transport, der für 94.5 % der Umweltauswirkungen des gesamten Transportbereichs verantwortlich ist, durch Elektrofahrzeuge ersetzt. Auch in diesem Fall wurde das Gesamtergebnis der Umweltwirkungen entsprechend neu berechnet.

Die Szenarien wurden ebenfalls mit Hilfe von Parametern in Excel definiert und mit einem Makro in SimaPro importiert. Die Werte für die Parameter wurden ebenfalls in einer Excel Tabelle zusammengefasst und direkt in SimaPro eingelesen.

7.1 Energie

Für die Variation der Energieträger wurde ein neuer erneuerbarer Energiemix in SimaPro erstellt («*Renewable energy mix*»). Hierfür wurden die Anteile der verschiedenen Energieträger in Deutschland im Jahr 2024¹⁴ genommen und auf 100 % hochgerechnet. Dieser Datensatz besteht aus einem Mix von Wind-(54 %), Solar-(23 %), Biomassen-(15 %) und Wasserkraftstrom (8 %). Ausserdem wurden Szenarien mit folgenden Energieträgern erstellt: Biogas, Biomasse, Wasserkraft, Wind, Solar und Nuklear.

Die Datensätze für andere Energieträger, wurden mithilfe des Konvertierungsdatensatzes in Niederspannungsstrom umgewandelt.

¹⁴ [Kreisdiagramme zur Stromerzeugung | Energy-Charts](#)

7.1.1 Stromverbrauch für Geldausgabeautomaten

Fig. 7.1 zeigt den Gesamtpunktwert der Studie, aufgeteilt in die verschiedenen Wirkungskategorien, wenn der Stromverbrauch für die Geldausgabeautomaten, der im Referenzszenario mit dem «consumption mix» modelliert wurde, mit anderen Energieträgern ausgetauscht wird.

Die höchste Reduktion im Vergleich zum Referenzszenario kann durch den Strom aus Windkraft erzielt werden. Auch die Verwendung eines erneuerbaren Strommixes kann eine erhebliche Reduktion von 34 % mit sich bringen.

Insgesamt macht die Verwendung eines sauberen Strommixes für die Geldausgabeautomaten einen viel grösseren Unterschied auf das Gesamtergebnis als in den anderen Phasen (siehe Fig. 7.2 und Fig. 7.3), da dieser den grössten Anteil des gesamten Stromverbrauchs repräsentiert.

Die Verwendung von Geothermie als Energieträger bringt ein deutlich schlechteres Gesamtergebnis mit sich als das Referenzszenario. Das liegt daran, dass der Datensatz der EF Datenbank hierfür ein «flash steam» Geothermiekraftwerk verwendet, welches für Island repräsentativ ist. Diese Art Kraftwerk hat häufig höhere direkte Emissionen, wie z.B. Schwefelwasserstoff, welche hier in der EF 3.1 Methode berücksichtigt werden. Dies führt auch zum erhöhten Wert für die Kategorie «Ökotoxizität, Süsswasser». Es ist nicht bekannt, ob solche Kraftwerke in Deutschland zu den gleichen Problemen führen würden und ob dieser Datensatz die Situation wirklich richtig darstellt. Den Autoren der vorliegenden Studie waren solche spezifischen Probleme der Geothermie bisher nicht bekannt.

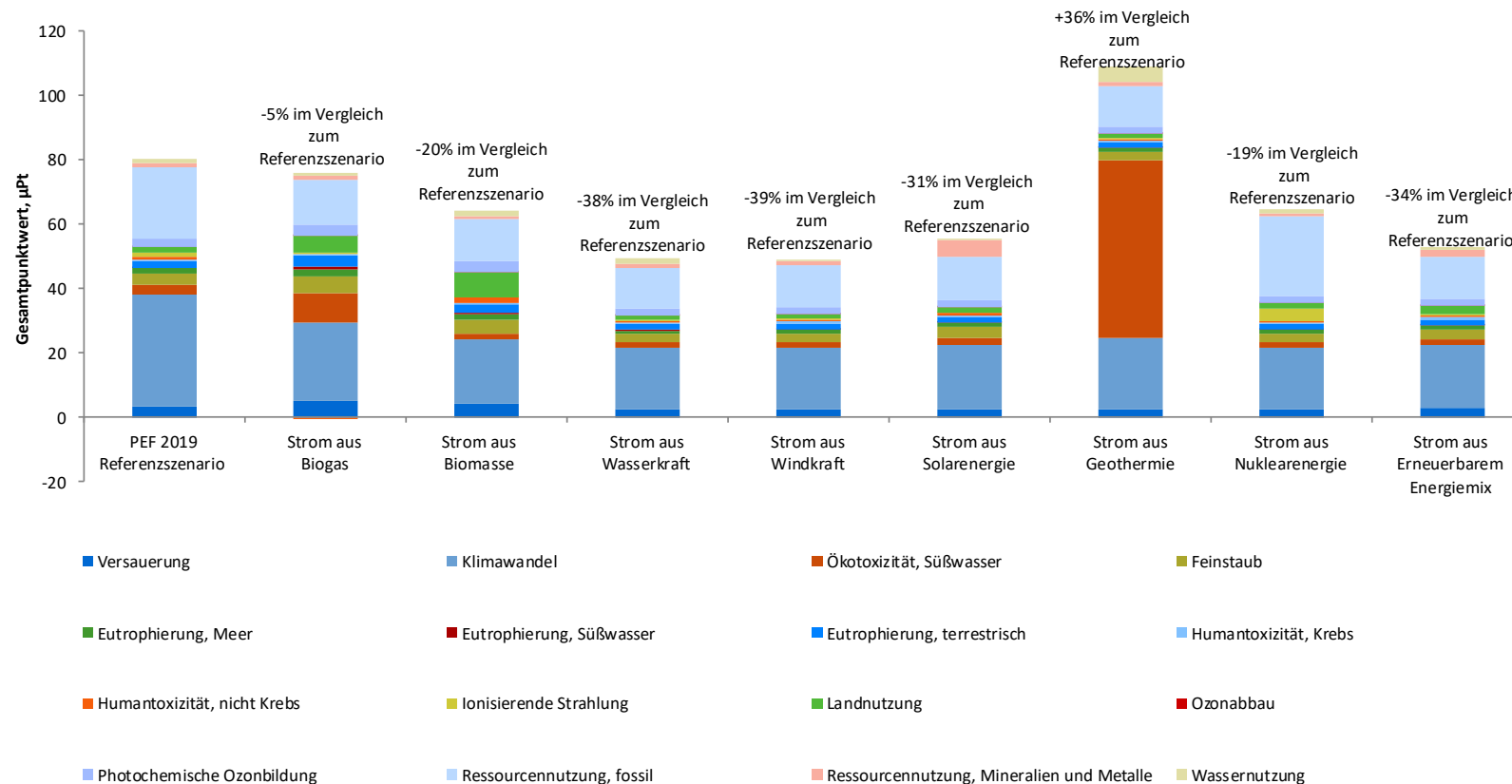


Fig. 7.1 Gesamtpunktwert und Einteilung in Wirkungskategorien für das Szenario Energie für Geldausgabeautomaten – Variierung der Energieträger und Einfluss auf Gesamtergebnis

7.1.2 Stromverbrauch für die Bearbeitungstätigkeit in der Verteilungsphase

Fig. 7.2 stellt den Gesamtpunktwert der Studie dar, aufgeschlüsselt nach Wirkungskategorien, unter der Annahme, dass der Stromverbrauch während der Bearbeitungstätigkeit in der Verteilungsphase durch alternative Energieträger ersetzt wird. In der Verteilungsphase wurde, anders wie für die anderen Stromverbräuche, ein eigen für die PEF-Studie erstellter Strommix genutzt, der auf Basis der Fragebögen erstellt wurde. Daher sind

die Verhältnisse der Reduktionen/Erhöhungen der Umweltbelastungen in diesem Szenario nicht dieselben wie in den Szenarien der Kapitel 7.1.1 und 7.1.3.

Im Vergleich zu einer Variierung des Stromverbrauchs für GAA, kann hier durch die Verwendung eines erneuerbaren Strommixes, nur eine Reduktion des Gesamtergebnisses um 5 % erzielt werden. Da der für die PEF-Studie erstellte Strommix, im Gegenteil zum «consumption mix», eine geringere Umweltbelastung hat als Strom von Biogas, sieht man in diesem Szenario eine Verschlechterung des Gesamtergebnisses um 4 %. Die Verwendung von Geothermie schliesst jedoch immer noch deutlich schlechter ab.

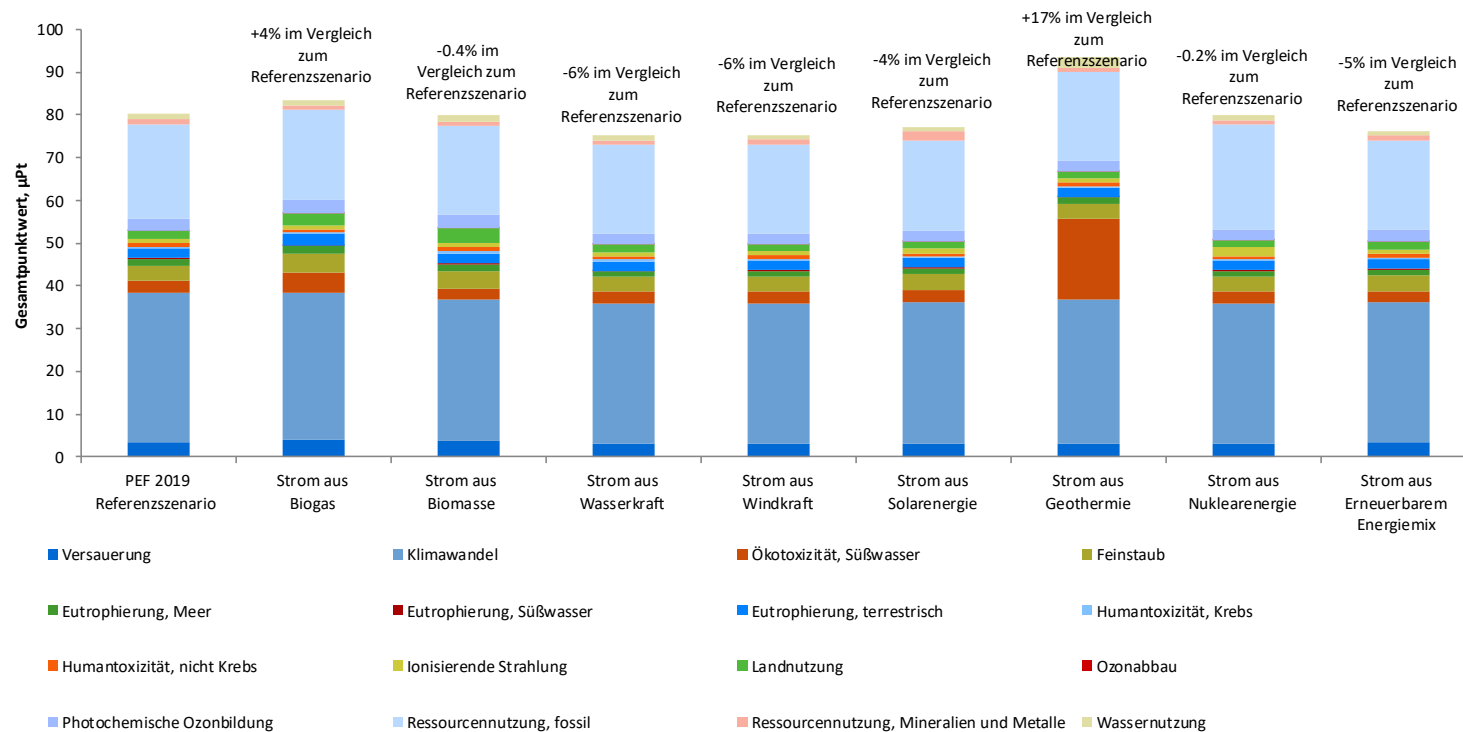


Fig. 7.2 Gesamtpunktwert und Einteilung in Wirkungskategorien für das Szenario Energie für die Bearbeitungsaktivitäten in der Verteilungsphase – Variierung der Energieträger und Einfluss auf Gesamtergebnis

7.1.3 Stromverbrauch in der Nutzungsphase

In Fig. 7.3 ist der Gesamtpunktwert der Studie, differenziert nach den einzelnen Wirkungskategorien, dargestellt. Dabei wurde analysiert, wie sich eine Lieferung des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase durch andere Energieträger auf das Ergebnis auswirkt.

In diesem Szenario wird wie im Kapitel 7.1.1, der «consumption mix», mit verschiedenen Energiequellen ersetzt. Daher erkennt man hier dieselben Trends, jedoch mit einer deutlich geringeren Wirkung auf das Gesamtergebnis. Durch die Verwendung eines erneuerbaren Energiemixes können hier nur 4 % der Umweltbelastungen eingespart werden, was nur ca. einem Achtel entspricht von dem, was in dem Szenario mit den Geldautomaten eingespart werden kann. Ebenfalls führt einzig die Verwendung von Geothermie allein zu einer Verschlechterung des Gesamtergebnisses gegenüber dem Referenzszenario.

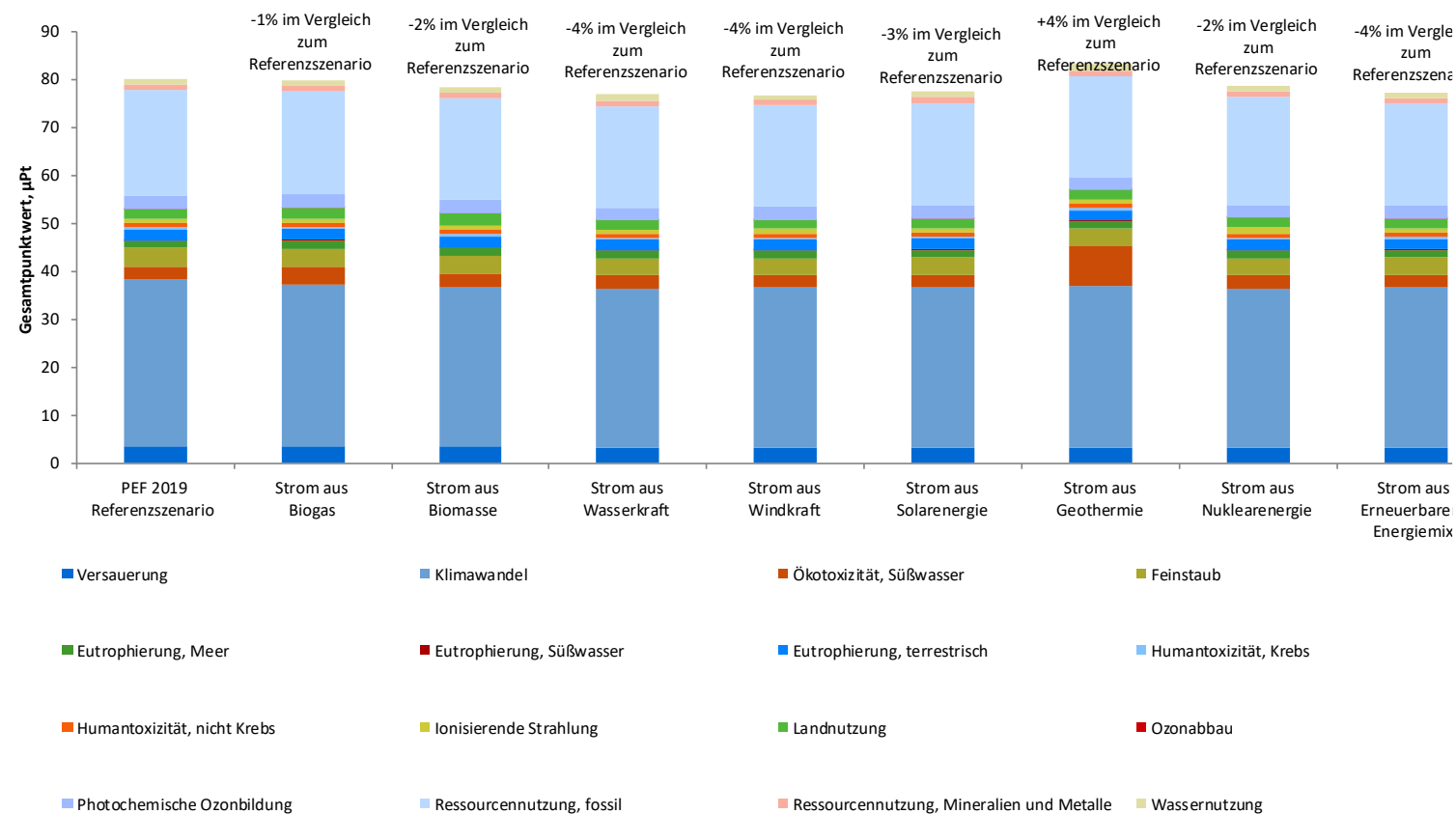


Fig. 7.3 Gesamtpunktwert und Einteilung in Wirkungskategorien für das Szenario Energie für die Nutzungsphase – Variierung der Energieträger und Einfluss auf Gesamtergebnis

7.2 Transport

Die nationalen Transporte der WDL haben den grössten Einfluss auf den Gesamtpunktwert, um genauer zu sein der darin enthaltene Transport mit gepanzerten und nicht-gepanzten Fahrzeugen, welche als «*Articulated lorry transport, Euro 5, Total weight <7.5 t {EU+EFTA+UK} | diesel driven, Euro 5, cargo | consumption mix, to consumer | up to 7,5t gross weight / 3,3t payload capacity | LCI result*» modelliert wurden. Es wird daher als Szenario dieser Datensatz ersetzt, mit einem Datensatz für einen elektrischen LKW. Da es keinen elektrischen LKW mit dem gleichen Gewicht als Datensatz gibt, wurde der am nächsten plausibelste gewählt: «*Lorry, Total weight 7,5 -12 t, electric / 5t payload capacity {GLO} | electric driven, cargo | consumption mix, to consumer | 7.5 - 12t gross weight / 5t payload capacity | Unit process, single operation*». Bei diesem Datensatz wurde noch, mit Hilfe der in der Datenbank vordefinierten Parameter, die Nutzlast auf 50 % der vorgegebenen gesetzt, um die Panzerung des Wagens zu berücksichtigen und der Auslastungsfaktor auf 0.3 angepasst.

Die ebenfalls in den nationalen Transporten der WDL enthaltenen Begleitfahrzeuge die als «*Passenger car, average {GLO} | technology mix, gasoline and diesel driven, Euro 3-5, passenger car | consumption mix, to consumer | engine size from 1,4l up to >2l | LCI result*» modelliert sind, wurden ebenfalls als Elektroauto modelliert, mit dem Datensatz: «*Car electric {GLO} | electric driven, Passenger Car | consumption mix, to consumer | electricity consumption 23.5 kWh/100km | Unit process, single operation*».

Die Datensätze für die elektrischen Fahrzeuge enthalten mehrere Dummies: für den Stromverbrauch, die Produktion des Fahrzeugs und die Strassennutzung. Es werden die folgenden zwei Szenarien gerechnet: es wird einmal der «*consumption mix*» für den Stromverbrauch eingesetzt und dann noch einmal der «*renewable energy mix*» welcher in Kapitel 7.1 beschrieben wird. Für die Strasse gibt es zum Zeitpunkt der Studie keinen Datensatz, weshalb für diesen nichts eingesetzt werden konnte. Um die Produktion der Fahrzeuge zu berücksichtigen, wurden folgende Datensätze verwendet: «*Truck production (7.5t - 12t gross weight) {GLO} | truck production without EoL | single route, at producer | 7.5t - 12t gross weight | LCI result*», «*Passenger car production (medium, gasoline) {GLO} | car production without EoL | single route, at producer | medium, gasoline | LCI result*».

Beim Datensatz «*Lorry, Total weight 7,5 -12 t, electric / 5t payload capacity {GLO} | electric driven, cargo | consumption mix, to consumer | 7.5 - 12t gross weight / 5t payload capacity | Unit process, single operation*» ist in der EF 3.1 Datenbank als Standardeinheit 0.1 kgkm angegeben. Dieser Wert ist im Vergleich zu den anderen Transportdatensätzen falsch, und wurde daher auf 100 kgkm geändert, um die elektrischen Transporte zu modellieren.

Das Gesamtergebnis wurde dann mit den elektrischen Fahrzeugen berechnet und mit dem initialen Ergebnis verglichen. Die Ergebnisse sind in Fig. 7.4 abgebildet. Bei der Deckung des Strombedarfs mit dem normalen Strommix, kann durch die Verwendung von Elektrofahrzeugen für die nationalen WDL-Transporte, das Gesamtergebnis lediglich um 4 % gesenkt werden. Jedoch kann, durch die Verwendung eines erneuerbaren Energiemixes, der Gesamtpunktwert um 23 % gesenkt werden.

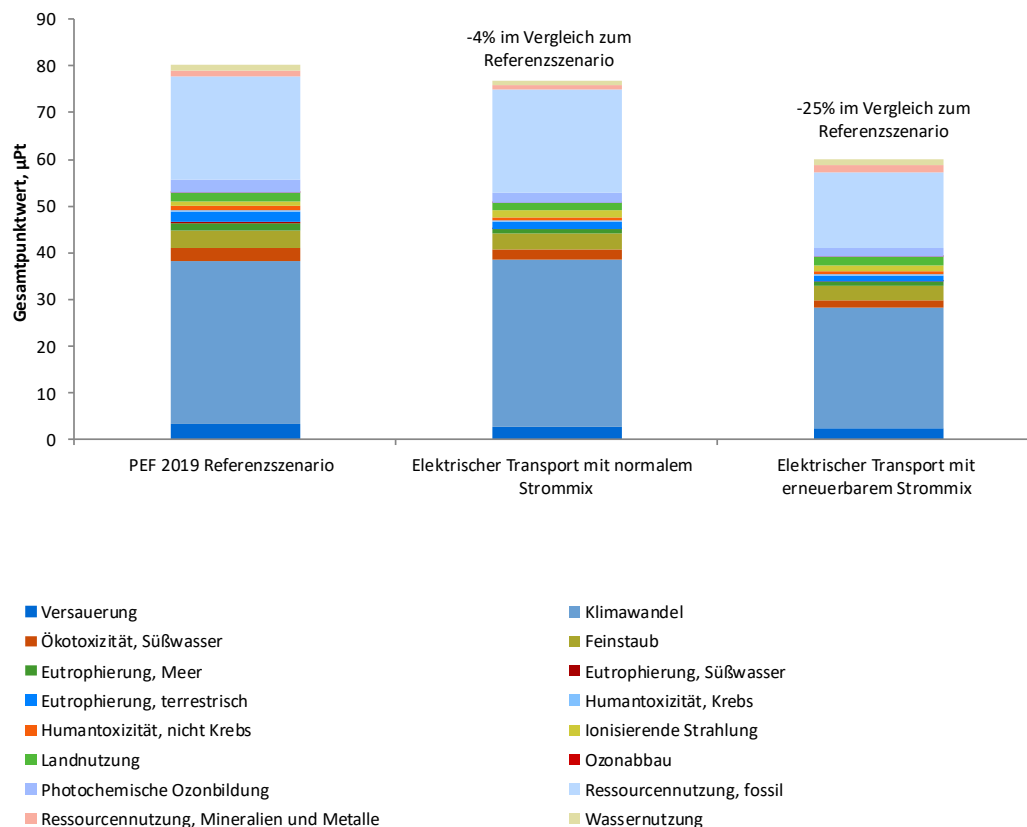


Fig. 7.4 Gesamtpunktwert und Einteilung in Wirkungskategorien für die Szenarien elektrischer Transport mit normalem Strommix und erneuerbarem Strommix für die WDL-Transporte.

7.3 Kombination der Szenarien

Die folgenden Szenarien wurden kombiniert, um ein möglichst umweltfreundliches Szenario abzubilden: Der Energiebedarf für die Geldausgabeautomaten, für die Bearbeitung in der Verteilungsphase und für die Nutzungsphase wurden mit dem «Renewable energy mix» modelliert (siehe Kapitel 7.1). Ausserdem wurde der nationale Transport der WDL mit Elektrofahrzeugen modelliert. Die Ergebnisse sind in Fig. 7.5 abgebildet. Im Vergleich zum Referenzszenario kann durch die Kombination von Elektrofahrzeugen und einem erneuerbaren Strommix, der Gesamtpunktwert um 68 % reduziert werden.

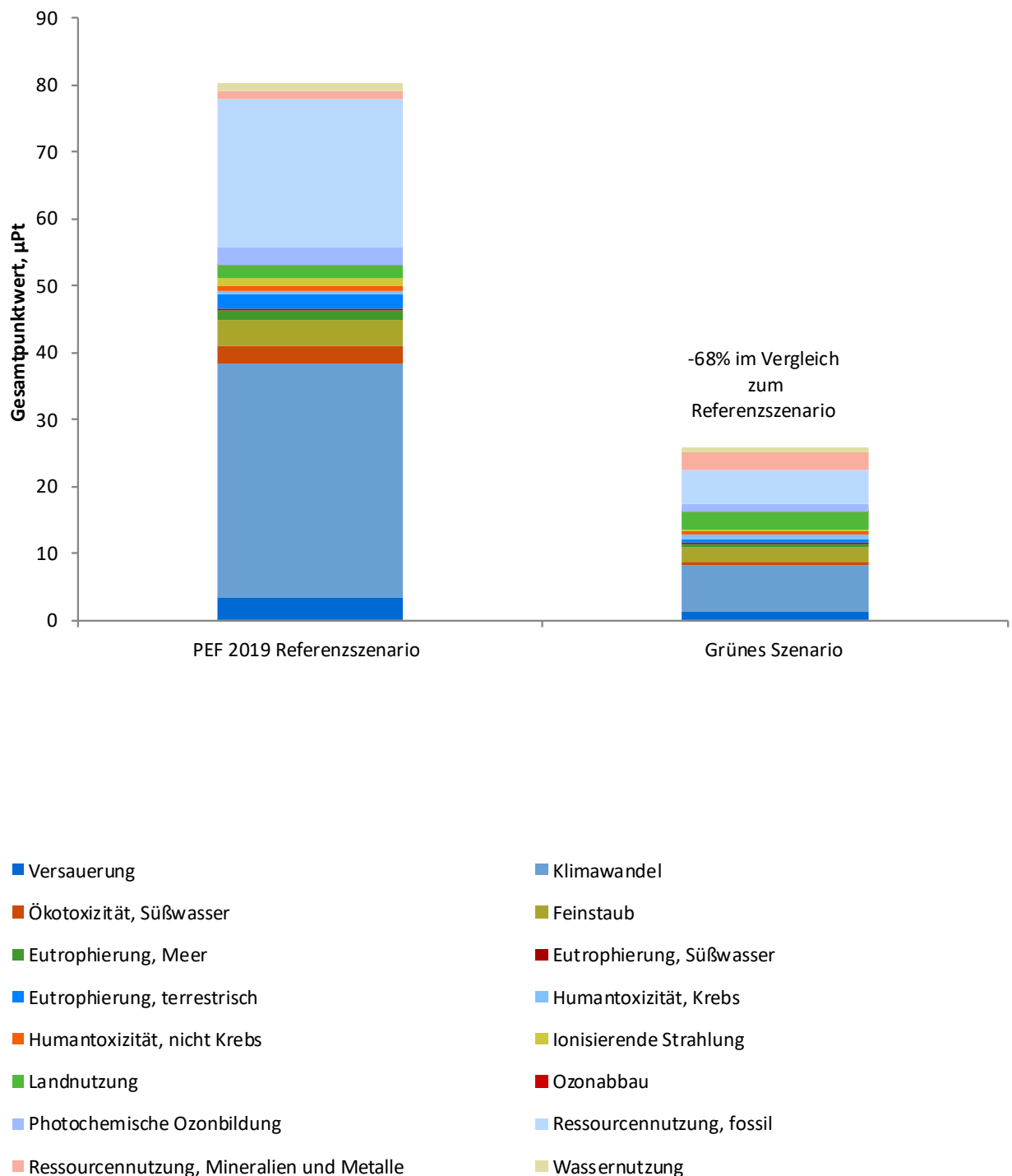


Fig. 7.5 Gesamtpunktwert und Einteilung in Wirkungskategorien für ein grünes Szenario

8 Interpretation

Die Auswertungen werden entsprechend der Fragestellungen in Tab. 1.1 diskutiert. Hier handelt es sich um die Interpretierungsphase; die Ergebnisse der Sachbilanz und der Lebenszyklus-Folgenabschätzung werden im Hinblick auf das Ziel und den Untersuchungsrahmen interpretiert. In dieser Phase werden die wichtigsten Wirkungskategorien, Lebenszyklus-Phasen und Prozesse identifiziert.

Dabei werden die in der Zieldefinition festgelegten Fragen beantwortet. Schlussfolgerungen und Empfehlungen werden basierend auf den Ergebnissen abgeleitet.

8.1 Vergleich mit Literaturwerten für den Bargeldumlauf

In diesem Kapitel wird eine Gegenüberstellung der Ergebnisse zu Literaturwerten durchgeführt.

Im Vergleich zur EZB Studie (ECB 2023), scheinen die Ergebnisse für die Gesamtumweltbelastungen in dieser Studie etwas niedriger. Dies liegt daran, dass in der EZB-Studie noch die Produktion der Banknoten mit einberechnet wurde (Block 1). Wenn nur der Banknotenumlauf (Block 2) betrachtet wird, der genau die Systemgrenzen dieser Studie abbildet, liegt der Gesamtpunktwert bei 88 μ Pt (mit früherer Version der Bewertungsmethode), was fast identisch mit dem Gesamtpunktwert ist, der in dieser Studie berechnet wurde. Auch die Zahlen für den CO₂-Fussabdruck liegen, mit 1.43 kg CO₂ (EZB-PEF-Studie) und 1.26 kg CO₂ (in dieser Studie), dicht beieinander.

Eine weitere Studie zum Vergleich von Barzahlungen und elektronischen Zahlungen wurden im Auftrag der EDPIA erstellt (EDPIA 2024). Für Deutschland werden dort 18 Gramm CO₂ pro Zahlungsvorgang berechnet. Damit errechnet sich ein Wert von knapp 2 kg CO₂-eq pro Person und Jahr (bei ca. 108 Zahlungsvorgängen). Dieser Wert ist höher als in der vorliegenden Studie, da zusätzliche Aspekte wie die Bargeldherstellung oder Autofahrten zum GAA mitberücksichtigt werden. Die Größenordnung der beiden Studie im Vergleich ist aber realistisch.

Der Vergleich mit Literaturwerten zeigt, dass die Ergebnisse für die modellierten Daten plausibel bzw. in der Größenordnung früherer Studien liegen.

8.2 Referenzwerte Gesamtumweltbelastung zur Einordnung der Ergebnisse

8.2.1 Gesamtkonsum

Die EU-Kommission hat ein [Life Cycle Assessment \(LCA\)-basierendes Rahmenwerk](#) erstellt, um die Entwicklung des gesamten ökologischen Fußabdrucks der EU-Produktion und des Pro-Kopf-Konsums zu überwachen.

Für die EZB-PEF-Studie wurde ein Vergleich der Barzahlung in Europa mit anderen jährlichen Aktivitäten eines EU-Bürgers durchgeführt. Diese beziehen sich allerdings auf Berechnungen mit einer früheren Version der EF-Bewertungsmethode. Die Punktwerte sind deshalb nicht 1:1 mit der vorliegenden Studie vergleichbar.

Zum Pro-Kopf-Konsum zählen Elektrogeräte, Haushaltswaren, Mobilität, Wohnen und Nahrungsmittel. Die jährlichen potenziellen Umweltauswirkungen der EU-Bürger im Jahr 2019 betragen 1'003'686 μ Pt (ECB 2023). In der EZB-PEF-Studie verursachen die durchschnittlichen jährlichen Barzahlungen einer Person im Euro-Währungsgebiet nur einen kleinen Teil (0.0101 %) des ökologischen Fußabdrucks eines EU-Bürgers.

Die EU-Studie zum Konsumfussabdruck wurde in der Zwischenzeit aktualisiert (Sanyé Mengual & Sala 2023) und dabei die gleiche Version der Bewertungsmethode wie in der vorliegenden Studie verwendet. Gemäss Figure 37 in dieser Studie beträgt der Gesamtfussabdruck für Europa ca. 0.95 Pt. pro Jahr und pro Person. Für Deutschland liegt der Wert bei etwa 1.02 Pt. pro Jahr und Person

In dieser Studie werden 80 μ Pt. pro Jahr und Person für den Bargeldumlauf errechnet. Dies entspricht 0.0084 % der europäischen und 0.0078 % der deutschen Gesamtbelastung. Damit ist der Einfluss der durchschnittlichen jährlichen Barzahlungen einer Person relativ gering.

8.2.2 Konsumbereiche

Auf Grundlage eigener Sachbilanzdaten wurden weitere Referenzwerte zu einzelnen Konsumbereichen in Tab. 8.1 berechnet (ESU-services 2025a; Jungbluth et al. 2020). Auch diese Referenzwerte liegen um mehrere Grössenordnungen über den hier für Bargeldumlauf berechneten Werten pro Person und Jahr.

Tab. 8.1 Referenzwerte zur Umweltbelastung und Treibhausgasemissionen von Konsumbereichen in Deutschland

EF3.1	GWP (100a)	Bezugspunkt
Punkte	kg CO ₂ -eq	
0.363	5'203	Jährlicher Energiebedarf in Deutschland pro Person, 2019
0.203	2'886	Durchschnittliche Mobilität pro Person in DE, 2019
0.189	1'653	Durchschnittlicher Nahrungsmittelkonsum pro Person in DE, 2020
0.755	9'742	Summe

8.2.3 Einzelne Konsumaktivitäten

Die aktuellen konsumbedingten Umweltbelastungen pro Person und Jahr liegen in der Schweiz bei etwa 1.5 EF-Punkten. Tab. 8.2 zeigt weitere typische Referenzwerte für das EF-Punktesystem, berechnet mit der EF 3.1 Methode. Die durch den Bargeldkreislauf in Deutschland verursachte Umweltbelastung beträgt 80 µPt pro Jahr und pro Person nach der EF3.1-Methode. Um diese Zahl einzuordnen, lassen sich folgende Vergleiche mit alltagsnahen Referenzwerten heranziehen:

- Sie entspricht etwa der Gesamtumweltbelastung durch die direkte Emission von 2.87 Kilogramm fossilem CO₂.
- Im Bereich Mobilität entspricht die Belastung 9.33 Kilometern Flugreise oder rund 5.05 Kilometern Autofahrt (bei durchschnittlicher Auslastung von 1.6 Personen).
- Im Vergleich zum täglichen Nahrungsmittelkonsum einer Einzelperson in der Schweiz (2018) entspricht die Belastung dem Konsum von etwa 11 % eines Tagesbedarfes.
- Bezogen auf den privaten Gesamtkonsum einer Person in der Schweiz (2018) macht die Belastung rund 2 % eines durchschnittlichen Tageskonsums aus.

Diese Vergleiche verdeutlichen, dass der Bargeldkreislauf, trotz komplexer logistischer Strukturen, in Relation zu anderen alltäglichen Aktivitäten eine völlig vernachlässigbare Umweltbelastung verursacht.

Tab. 8.2 Referenzwerte für Produkte und Dienstleistungen, die einen Mikro-EF Punkt verursachen gemäss Daten der ESU-Datenbank (ESU-services 2025b, c)

EF3.1	Ein Mikro-Punkt (Millionstel Punkt) entspricht
23.7	Liter Wasser ab Leitung in der Schweiz
0.0009	Zentimeter Strasse, für ein Jahr genutzt
0.0359	Kilogramm fossiles CO ₂ , direkt emittiert
0.0012	Kilogramm fossiles Methan, direkt emittiert
0.01113	Gramm Kupfereintrag in landwirtschaftlich genutztem Boden
0.0112	Liter Rohöl gefördert, mit Transport bis zur Raffinerie
0.0002	Gramm Pestizidanwendung in der Landwirtschaft
0.025%	des privaten Tageskonsums einer Person in der Schweiz, 2018
0.024%	des Tageskonsums einer Person in der Schweiz
0.1166	km Transport einer Person per Flugzeug
0.0631	km Transport einer Person per Auto (Auslastung 1.6 Personen)
1.6206	km Transport einer Person per Fahrrad
0.19%	eines vegetarischen Menüs mit 4 Gängen
0.07%	eines fleischhaltigen Menüs mit 3 Gängen
0.14%	des täglichen Nahrungsmittelkonsums einer Person in der Schweiz, 2018
0.0022	Plastiktragtaschen (Produktion, Vertrieb und Entsorgung)
0.0002	T-Shirts aus Baumwolle
0.00001	der Produktion eines Laptops
0.3%	des täglichen Konsums für Hobbies/Freizeitaktivitäten in der Schweiz, 2018
0.6%	des täglichen Konsums für Möbeln und Haushaltsgeräten in der Schweiz, 2018

8.3 Referenzwerte Treibhausgasemissionen zur Einordnung der Ergebnisse

8.3.1 Europa

Der jährliche EU-Konsum pro Kopf liegt bei ca. 8'200 kgCO₂-eq. (Zebisch 2018). Die Kilogramm CO₂-eq. der durchschnittlichen jährlichen Barzahlung einer Person in Deutschland liegt bei 1.26 kg CO₂-eq., und entspricht somit nur einem geringen Anteil (0.015 %) des gesamten EU-Konsum-Fußabdrucks.

8.3.2 Deutschland

Die Treibhausgasemissionen pro Person in Deutschland wurden in verschiedenen Studien erhoben (siehe z.B. Tab. 8.3). Die genauen Werte hängen dabei auch von der Bilanzierungsmethode ab.

Tab. 8.3 Literaturvergleich zu Treibhausgas-Emissionen pro Person in Deutschland¹⁵

Quelle	Jahr	t CO ₂ /Person.	Kommentar
DIW	2002	10,3	nur energiebedingte CO ₂ Emissionen, Quellenbilanz
UBA	2003	10,5	energiebedingte CO ₂ Emissionen plus Industrieprozesse, Quellenbilanz
UBA	2003	12,3	CO ₂ -Äquivalente, alle Sektoren, Quellenbilanz
UBA	2004	10,7	energiebedingte CO ₂ Emissionen plus Industrieprozesse, Quellenbilanz
UBA	2005	12,15	CO ₂ -Äquivalente, alle Sektoren, Quellenbilanz
UBA	2005	10,6	energiebedingte CO ₂ Emissionen plus Industrieprozesse, Quellenbilanz
StBA	2004	12,0	CO ₂ -Äquivalente für CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , Quellenbilanz.
StBA	2003	11,8	CO ₂ -Äquivalente für CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , Verbrauchsbilanz.
StBA	2003	9,99	CO ₂ Emissionen, Verbrauchsbilanz
WI	2006	5 – 14,5	persönliche Bilanz, CO ₂
Weber	1990	10 – 12,5	persönliche Bilanz, CO ₂

Weitere Daten, die im Rahmen der Recherche 2020 gefunden wurden, unterscheiden sich nicht wesentlich von Tab. 8.3. Deutschland wies nach dieser Quelle ein CO₂-Äquivalenten von 10.4 t/Person im Jahr 2018 auf.^{16,17}

Für eine ESU-Studie (Jungbluth et al. 2020) wurden zusätzlich eigene Berechnungen durchgeführt (Tab. 8.4). Auf dieser Basis und weiteren Angaben vom Umweltbundesamt, sowie von Klima-Aktiv publizierten Zahlen, wurde dann eine Abschätzung für diese Studie durchgeführt. Für das Referenzjahr 2019 beträgt diese Abschätzung etwa 12.5 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr und Person mit Wohnsitz in Deutschland, verursacht durch den Konsum an Gütern und Dienstleistungen im In- und Ausland. Damit liegt der Gesamtwert etwas höher als in der häufig verwendeten Datengrundlage für den Klima-Aktiv Rechner (11 Tonnen, siehe oben).

¹⁵ <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3327.pdf>

¹⁶ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer> 27.10.2020

¹⁷ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#pro-kopf-emissionen> 27.10.2020

Die kgCO₂-eq. der durchschnittlichen jährlichen Barzahlung einer Person in Deutschland liegt bei 1.26 kgCO₂-eq., und entspricht somit nur einem geringen Anteil (0.01 %) des gesamten deutschen Konsum-Fußabdrucks in Höhe von 12.5 t CO₂-eq. pro Person und Jahr.

8.3.2.1 Ernährung

Der für unsere Studie berechnete Wert zur Ernährung in Tab. 8.4 liegt zwischen den durch deutsche Bundesämter publizierten Werten und genaueren Berechnungen einer Forschungsgruppe «Klimaschutzgutachten». Auf einer anderen Webseite des UBA werden sogar 3 Tonnen CO₂ durch die Ernährung angegeben.¹⁸ Es ist unklar, warum das UBA hierzu so widersprüchliche Zahlen publiziert.

Eine weitere Arbeit ermittelte ernährungsbedingte THG-Emissionen einschließlich der Beschaffung, Zubereitung und Entsorgung (cradle-to-grave) in Höhe von 2.7 t pro Person und Jahr (Eberle & Fels 2016). Dabei wurden 85 % durch die Ernährung in privaten Haushalten und 15 % durch die Außer-Haus-Verpflegung verursacht.¹⁹ Auf der LCA Food conference im Jahr 2020 wurde von den gleichen Autorinnen ein Wert von 2.8 t pro Person und Jahr genannt.²⁰ Diese Studien berücksichtigen zusätzlich Emissionen beim Konsumenten (Lagerung, Zubereitung, Heimtransport) und die Resultate sind damit höher.

8.3.2.2 Energie

Bei den energiebedingten Emissionen ist die Übereinstimmung mit den Zahlen des Umweltbundesamtes recht gut.

8.3.2.3 Mobilität

Die eigene Berechnung für Mobilität ist höher als in den Literaturdaten, da der heutige, effektive Verbrauch von Pkw berücksichtigt wird und der RFI Effekt für Flugemissionen zusätzlich berechnet wird. Für die übrigen Konsumkategorien musste die Zuordnung teilweise etwas angepasst werden.

¹⁸ <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/lebensmittelabfaelle-verursachen-4-prozent-der>

¹⁹ https://www.nutrition-impacts.org/media/2016_BMEL_Klimaschutzgutachten.pdf

²⁰ <https://virtual.lcafood2020.com/session/environmental-impacts-of-the-german-food-basket-with-a-special-focus-on-water-use-and-water-scarcity-oral/>

Tab. 8.4 Datengrundlagen zu Treibhausgasemissionen in Deutschland für das Referenzjahr 2019

	Klima-Aktiv CO2-Rechner	Eigene Berechnungen	C7 CO2-Gehalt des privaten Konsums nach Bedarfsfeldern 2012	Statistisches Bundesamt	Klimagutschriften	Grüne Produkte	Grüne Produkte	Deutschland	Deutschland
	t	kg	t	t	t	%	t	kg	kg
Nahrungsmittel	1.69	2'341		1.80	2.30	15%	1.21	2'341	18.9%
Gastgewerbe und Hotels			0.24					600	4.9%
Bekleidung			0.24			24%		300	2.4%
Wohnen (Miete, Energie, Wasser, Entsorgung)				3.07		39%	3.10	3'070	24.8%
Anteil Miete								452	3.7%
Energie	2.75	2'253						2'253	18.2%
Wasser, Entsorgung		365						365	2.9%
Wohnungsbau, Möbel, HH-Geräte, Güter				1.08				1'390	11.2%
Wohnungsbau								600	4.9%
Möbel und Haushaltsgeräte			0.14			13%		450	3.6%
andere Güter			0.94			30%	1.50	340	2.7%
Gesundheit			0.09					90	0.7%
Private Mobilität	2.08	3'125		2.07		26%	2.04	3'125	25.3%
Dienstleistungen (Kommunikation, Freizeit, Bildung)	3.79	-	0.73	1.02		12%		593	4.8%
Kommunikation						13%		75	0.6%
Freizeit & Kultur								318	2.6%
Bildung			0.33					200	1.6%
Verbleibende Endnachfrage Staat	0.86	-				9%		860	7.0%
Total	11.17	8'083	8.17	8.24		182%	7.85	12'369	100.0%
Referenzjahr	2019	2019	2014	2016	2016	2014			
Quelle	http://www.uba.co2-rechner.de/de_DE/start#panel-calc	ESU-services	https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/publikationen/tabelleband_februar-2014.pdf	Umweltökonomische Gesamtrechnungen 2016	http://www.nutrition-impacts.org/media/2016_BMEL_Klimaschutzgutschriften.pdf	https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/gruene-produkte-in-deutschland-2017	Diese Studie		

8.4 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Product Environmental Footprint (PEF)-Studie zum Bargeldumlauf in Deutschland bietet Einblicke in die Umweltauswirkungen des Bargeldkreislaufs für Euro-Banknoten in Deutschland ohne deren Produktionsphasen zu berücksichtigen. Dabei wurde der gesamte Lebenszyklus des Bargeldkreislaufs in den Phasen Verteilung, Nutzung und Lebensende untersucht. Die Studie zeigte, dass der größte Teil der Umweltauswirkungen auf die Transportprozesse und den Energieverbrauch für Geldausgabeautomaten (GAA) entfällt.

Der Energieverbrauch der GAA macht etwa 40 % der Gesamtumweltbelastung aus. Diese Automaten sind die Hauptschnittstelle für Verbraucher, um Bargeld zu erhalten, und der damit verbundene Stromverbrauch trägt auch erheblich zu den CO₂-Emissionen bei.

Darüber hinaus spielt der Transport von Banknoten innerhalb Deutschlands sowie grenzüberschreitend eine bedeutende Rolle bei den Umweltauswirkungen. Die Banknoten werden von der Deutschen Bundesbank innerhalb des eigenen Filialsystems verteilt. Von den Filialen der Deutschen Bundesbank aus übernehmen die WDL die Ver- und Entsorgung der KI und des Handels. Der damit verbundene Transport verursacht nicht nur CO₂-Emissionen, sondern auch andere Umweltbelastungen durch den Kraftstoffverbrauch, welcher auch von den erhöhten Sicherheitsmaßnahmen, die für den Transport erforderlich sind, beeinflusst wird.

Im Vergleich zum Gesamtkonsum und einzelnen Bereichen des Konsums, wie etwa der Mobilität oder der Ernährung, sind die Umweltauswirkungen des Bargeldkreislaufs insgesamt jedoch sehr gering. Die Emissionen des Bargeldkreislaufs stellen nur einen kleinen Teil der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland dar. Insbesondere in den Bereichen Mobilität und Energie sind die Auswirkungen wesentlich größer. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass der Bargeldkreislauf zwar eine gewisse Umweltbelastung verursacht, jedoch in einem breiteren Kontext betrachtet relativ unbedeutend bleibt.

Dies gilt auch für die Betrachtung eines einzelnen Zahlvorganges. In der Regel werden die Bereitstellung, Produktion und Entsorgung der gekauften Produkte und Dienstleistungen um ein Vielfaches höher sein als die durch das Zahlungsmittel verursachten Belastungen. Die Studie liefert damit auch keine Grundlage den Bargeldkreislauf grundsätzlich in Frage zu stellen und z.B. digitale Zahlungen aus Umweltsicht zu fordern.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der sich aus der Analyse ergibt, ist die Unsicherheit hinsichtlich des Strommixes und der genauen Transportdistanzen. Diese Faktoren können die Endergebnisse beeinflussen, da sich die Art des verwendeten Stroms und die Effizienz der Transportmittel direkt auf die Umweltbilanz auswirken. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, dass die PEF-Studie diese Variablen transparent macht. Die Modellierung der Umweltauswirkungen durch den Einsatz von Datensätzen und Szenarien trägt dazu bei, die Unsicherheiten zu minimieren und die Robustheit der Ergebnisse zu erhöhen.

Zudem bietet die Studie als Ergänzung eine Vergleichbarkeit mit anderen ähnlichen Ökobilanzstudien, insbesondere der PEF-Studie der Europäischen Zentralbank (EZB), die sich mit der gesamten Euro-Banknotenproduktion und -verwendung im Eurosystem beschäftigt. Während die EZB-Studie eine umfassende Betrachtung der gesamten Banknotenproduktion und -nutzung im Euro-Raum umfasst, konzentriert sich diese PEF-Studie ausschließlich auf den Bargeldkreislauf in Deutschland. Die Ergebnisse dieser Studie sind somit spezifisch und bieten detaillierte Einblicke in die deutschen Verhältnisse, die für die Ableitung gezielter Maßnahmen zur Reduzierung der Umweltauswirkungen genutzt werden können.

Abschließend lässt sich feststellen, dass der ökologische Fußabdruck des Bargeldkreislaufs in Deutschland im Vergleich zu anderen Sektoren des Konsums klein ist, jedoch weiterhin Potenzial zur

Reduzierung von Umweltauswirkungen, z.B. beim Transport von Banknoten und dem Betrieb von Geldausgabeautomaten, besteht, so dass die Umweltauswirkungen im Bargeldkreislauf noch optimiert werden könnten.

8.5 Empfehlungen der Autoren der Studie

Folgende Empfehlungen können auf Grundlage der Studie zur Reduktion von Umweltbelastungen gegeben werden.

- **Fokus auf den Stromverbrauch der Geldausgabeautomaten (GAA):** Der Stromverbrauch der GAA stellt eine der größten Umweltbelastungen im Bargeldkreislauf dar, mit einem Anteil von 40 % am Gesamtumweltpunktwert. Um die Umweltauswirkungen zu reduzieren, wird empfohlen, falls noch nicht erfolgt, Technologien zur Energieeffizienz in diesen Automaten zu integrieren. Insbesondere die Verwendung von energieeffizienteren Geräten und die Implementierung von Energiesparmodi könnten dazu beitragen, den Energieverbrauch und somit die CO₂-Emissionen erheblich zu senken.
- **Reduktion des CO₂-Ausstoßes für den Transport in Verbindung mit künftig voranschreitenden technischen Innovationen:** Der Transport spielt eine zentrale Rolle in der Umweltauswirkung des Bargeldkreislaufs. Aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen für den Banknotentransport müssen jedoch bis auf weiteres die herkömmlichen Spezialfahrzeuge eingesetzt werden, für die es aktuell keine adäquaten umweltfreundlichen Alternativen gibt. Mit voranschreitenden technischen Innovationen könnte der Banknotentransport künftig ökologisch nachhaltiger ausgerichtet werden, um den CO₂-Ausstoß zu minimieren. Der Transport könnte dann durch emissionsärmere Fahrzeuge oder durch Fahrzeuge ohne CO₂-Emissionen, etwa durch Elektrofahrzeuge, erfolgen. Dies würde nicht nur den Energieverbrauch aus fossilen Brennstoffen reduzieren, sondern auch zur Senkung der Luftverschmutzung und der globalen Erwärmung beitragen.
- **Verwendung eines nachhaltigerem Strommixes:** Da der Stromverbrauch einen Grossteil der Emissionen des Bargeldkreislaufes ausmacht, würde eine Verbesserung des Strommixes erhebliche Vorteile mit sich bringen. Derzeit wird für den Betrieb der Geldautomaten vom durchschnittlichen Strommix ausgegangen, der sowohl erneuerbare als auch nicht erneuerbare Quellen umfasst. Ein verstärkter Einsatz von erneuerbaren Energien, wie Wind- und Solarstrom, könnte jedoch signifikante positive Auswirkungen auf die CO₂-Bilanz haben. Zusätzlich könnte die Deutsche Bundesbank zusammen mit anderen relevanten Akteuren im Bargeldkreislauf Initiativen ergreifen, um den Strommix der beteiligten Institutionen auf erneuerbare Energien umzustellen. Diese Maßnahme würde nicht nur die Umweltauswirkungen des Bargeldkreislaufs direkt beeinflussen, sondern auch ein starkes Signal für die Förderung von Nachhaltigkeit und die Reduzierung von CO₂-Emissionen im öffentlichen Sektor senden.

Durch die Kombination dieser Empfehlungen mit den bereits vorgeschlagenen Maßnahmen zur Reduktion des Stromverbrauchs und des CO₂-Ausstoßes beim Transport könnte der ökologische Fußabdruck des Bargeldkreislaufs in Deutschland weiter reduziert werden, wobei diese Ansätze teilweise kurzfristige und teilweise langfristige Potenziale darstellen, um den Bargeldkreislauf nachhaltiger zu gestalten und somit einen positiven Beitrag zur Erreichung der Klimaziele und zur Förderung einer grüneren Wirtschaft zu leisten.

Insgesamt zeigt die Studie, dass trotz des geringen ökologischen Fußabdrucks des Bargeldkreislaufs im Vergleich zu anderen Konsumbereichen ein Potenzial zur Verbesserung der Nachhaltigkeit besteht, das insbesondere durch technologische Innovationen und die Nutzung erneuerbarer Energien erschlossen werden kann. Dies darf aber nicht so interpretiert werden, als ob der Bargeldkreislauf auf Grundlage dieser Studie grundsätzlich in Frage gestellt werden sollte.

Hinsichtlich einer zukünftigen Aufdatierung der Studie ist insbesondere auf aktuelle, vollständige und transparente Hintergrunddaten zu achten. Falls diese in der EF Datenbank nicht verfügbar sind, sollten aktuellere Datenbanken, wie z.B. die ecoinvent Datenbank, in Betracht gezogen werden.

9 Literatur

- Andreasi Bassi et al. 2023 Andreasi Bassi S., Biganzoli F., Ferrara N., Amadei A., Valente A., Sala S. and Ardente F. (2023) Updated characterisation and normalisation factors for the Environmental Footprint 3.1 method. ISBN 978-92-76-99069-7, doi:10.2760/798894, JRC130796. EUR 31414 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- BAFU 2021 BAFU (2021) Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit: Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Bern, retrieved from: <https://www.bafu.admin.ch/uw-2121-d>.
- Boulay et al. 2018 Boulay A.-M., Bare J., Benini L., Berger M., Lathuillière M. J., Manzardo A., Margni M., Motoshita M., Núñez M., Valerie-Pastor A., Ridoutt B., Oki T., Worbe S. and Pfister S. (2018) The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). In: *Int J Life Cycle Assess*, **23**(2), pp. 368–378.
- Braunschweig et al. 2005 Braunschweig A., Schmid-Schönbein O., Goedkoop M., Effting S. and Madsen J. (2005) LCA of Euro Banknotes 2003: Final Report; Confidential. Directorate Banknotes, European Central Bank (ECB), Frankfurt.
- Crenna et al. 2019 Crenna E., Secchi M., Benini L. and Sala S. (2019) Global environmental impacts: data sources and methodological choices for calculating normalization factors for LCA. In: *Int J Life Cycle Assess*, **24**, pp. 1851–1877.
- De Laurentiis et al. 2019 De Laurentiis V., Secchi M., Bos U., Horn R., Laurent A. and Sala S. (2019) Soil quality index: Exploring options for a comprehensive assessment of land use impacts in LCA. In: *Journal of cleaner production*, **215**, pp. 63–74.
- Eberle & Fels 2016 Eberle U. and Fels J. (2016) Environmental impacts of German food consumption and food losses. In: *Int J Life Cycle Assess*, **21**(5), pp. 759–772, 10.1007/s11367-015-0983-7, retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0983-7>.
- ECB 2021 ECB (2021) Study on the payment attitudes of consumers in the euro area (SPACE). European Central Bank.
- ECB 2023 ECB (2023) Product Environmental Footprint study of euro banknotes as a payment instrument, retrieved from: <https://www.ecb.europa.eu/press/pubbydate/2023/html/ecb.pefreport202312~81e945e7aa.en.html>.
- EDPIA 2024 EDPIA (2024) The Environmental Impact of Digital Over Cash Payments in Europe. Oxfordeconomics, retrieved from: <https://www.oxfordeconomics.com/resource/the-environmental-impact-of-digital-over-cash-payments-in-europe/>.
- ELCD 2023 ELCD (2023) Environmental Footprint 3.1 Database, SimaPro Implementation (release November 2023), EF 3.1 data nodes retrieved in August 2023. Flemish institute for technological research (VITO), retrieved from: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/contactListEF.html>.
- ESU-services 2025a ESU-services (2025a) Data on demand: EcoSpold life cycle inventory datasets provided by ESU-services. ESU-services Ltd., Schaffhausen, CH, retrieved from: <https://www.esu-services.ch/data/data-on-demand/>.
- ESU-services 2025b ESU-services (2025b) ESU World Food LCA Database - LCI for food production and consumption (ed. Jungbluth N., Meili C., Bussa M., Ulrich M., Solin S., Muir K., Malinverno N., Eberhart M., Annaheim J., Keller R., Eggenberger S., König A., Doublet G., Flury K., Büsser S., Stucki M., Schori S., Itten R., Leuenberger M. and Steiner R.). ESU-services Ltd., Schaffhausen, CH, retrieved from: <https://www.esu-services.ch/data/fooddata/>.

- ESU-services 2025c ESU-services (2025c) The ESU background database based on UVEK-LCI DQRv2:2018. ESU-services Ltd., Schaffhausen, retrieved from: <https://www.esu-services.ch/data/database/>.
- European Commission 2016 European Commission (2016) Environmental Footprint Pilot Guidance document - Guidance for the implementation of the EU Product Environmental Footprint (PEF) during the Environmental Footprint (EF) pilot phase.
- European Commission 2021 European Commission (2021) Commission Recommendation (EU) 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations. In: 2279, pp. 1-396, retrieved from: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reco/2021/2279/oj>.
- European Committee for Standardisation (CEN) 2022 European Committee for Standardisation (CEN) (2022) EN 15804+A2:2020/AC2021 - Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products (includes Corrigendum :2021). European Committee for Standardisation (CEN), Brussels, retrieved from: <https://www.en-standard.eu/din-en-15804-sustainability-of-construction-works-environmental-product-declarations-core-rules-for-the-product-category-of-construction-products-includes-corrigendum-2021/>.
- Fantke et al. 2016 Fantke P., Evans J., Hodas N., Apte J., Jantunen M., Jolliet O. and McKone T. E. (2016) Health impacts of fine particulate matter. In: *Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators: Volume 1*. (Ed. Frischknecht R. and Jolliet O.). pp. 76-99. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, Paris.
- Fantke et al. 2017 Fantke P., Bijster M., Guignard C., Hauschild M., Huijbregts M., Jolliet O., Kounina A., Magaud V., Margni M., McKone T. E., Posthuma L., Rosenbaum R. K., van de Meent D. and van Zelm R. (2017) USEtox® 2.0 Documentation (Version 1), retrieved from: <https://usetox.org>.
- Frischknecht et al. 2000 Frischknecht R., Braunschweig A., Hofstetter P. and Suter P. (2000) Human Health Damages due to Ionising Radiation in Life Cycle Impact Assessment. In: *Review Environmental Impact Assessment*, 20(2), pp. 159-189.
- Horn et al. 2018 Horn R., Maier S., Bos U., Beck T., Lindner J. P. and Fischer M. (2018) LANCA® -Characterisation Factors for Life Cycle Impact Assessment, Version 2.5. Fraunhofer Verlag, ISBN 978-3-8396-0953-8, Stuttgart, retrieved from: <https://www.bookshop.fraunhofer.de/buch/LANCA/244600>.
- International Organization for Standardization (ISO) 2006a International Organization for Standardization (ISO) (2006a) ISO 14025: Environmental Labels and Declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures. ISO 14025, retrieved from: <https://www.iso.org>.
- International Organization for Standardization (ISO) 2006b International Organization for Standardization (ISO) (2006b) ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. ISO 14040:2006; Amd 1: 2020, Geneva, retrieved from: <https://www.iso.org>.
- International Organization for Standardization (ISO) 2006c International Organization for Standardization (ISO) (2006c) ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. ISO 14044:2006; Amd: 2017; Amd 2: 2020, Geneva, retrieved from: <https://www.iso.org>.
- International Organization for Standardization (ISO) 2022 International Organization for Standardization (ISO) (2022) ISO/TS 14074: Environmental management – Life cycle assessment – Principles, requirements and guidelines for normalization, weighting and

- interpretation. ISO/TS 14074:2022, Geneva, retrieved from: <https://www.iso.org/standard/61117.html>
- IPCC 2013 IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, retrieved from: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- IPCC 2021 IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, retrieved from: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- Jungbluth et al. 2020 Jungbluth N., Meili C. and Malinverno N. (2020) Aktualisierung 2020 WWF Klimarechner für Deutschland. ESU-services GmbH im Auftrag von WWF Deutschland, Schaffhausen, Schweiz, retrieved from: <https://www.wwf.de/themen-projekte/klimaschutz/wwf-klimarechner>.
- Jungbluth & Solin 2024 Jungbluth N. and Solin S. (2024) Environmental report and product declaration 2023. ESU-services GmbH, Schaffhausen, CH, retrieved from: <https://esu-services.ch/news/reporting/>.
- PCR 2012 PCR (2012) Product Category Rules (PCR) for Research and Experimental Development Services in Natural Sciences and Engineering (UN CPC 811). The International EPD System.
- Posch et al. 2008 Posch M., Seppälä J., Hettelingh J. P., Johansson M., Margni M. and Jolliet O. (2008) The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA. In: *Int J Life Cycle Assess*(13), pp. 477-486.
- Rosenbaum et al. 2008 Rosenbaum R. K., Bachmann T. M., Gold L. S., Huijbregts A. J., Jolliet O., Juraske R., Koehler A., Larsen H. F., MacLeod M., Margni M., McKone T. E., Payet J., Schuhmacher M., van de Meent D. and Hauschild M. Z. (2008) USEtox - the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle assessment. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*, **13**(7), pp. 532-546.
- Sanyé Mengual & Sala 2023 Sanyé Mengual E. and Sala S. (2023) Consumption Footprint and Domestic Footprint: Assessing the environmental impacts of EU consumption and production: Life cycle assessment to support the European Green Deal, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023.
- Saouter et al. 2018 Saouter E., Biganzoli F., Ceriani L., Versteeg D., Crenna E., Zampori L., Sala S. and R. P. (2018) Environmental Footprint : Update of Life Cycle Impact Assessment Methods – Ecotoxicity, freshwater, human toxicity cancer, and noncancer. JRC technical report. EUR 29495 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg ISBN 978-92-79-98182-1, DOI: 10.2760/178544.
- Seppälä et al. 2006 Seppälä J., Posch M., Johansson M. and Hettelingh J. P. (2006) Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator. In: *Int J Life Cycle Assess*, **11**(6), pp. 403-416.
- SimaPro 2025 SimaPro (2025) SimaPro 10.2 LCA software package. PRé Sustainability, Amersfoort, NL, retrieved from: <https://esu-services.ch/de/simapro/>.
- Struijs et al. 2009 Struijs J., Beusen A., van Jaarsveld H. and Huijbregts M. A. J. (2009) Aquatic Eutrophication. In: *ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation factors* (Ed. Goedkoop M., Heijungs R., Heijbregts M. A. J., De Schryver A., Struijs J. and Van Zelm R.).
- UBA 1999 UBA (1999) Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung

- nach ISO 14042 und 14043 Version '99. 92/99. Umweltbundesamt, Berlin, retrieved from: <https://www.umweltbundesamt.de>.
- van Oers et al. 2002 van Oers L., De Koning A., Guinée J. B. and Huppes G. (2002) Abiotic resource depletion in LCA - improving characterization factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook. *In*, pp.
- Van Zelm et al. 2008 Van Zelm R., Huijbregts M. A. J., Den Hollander H. A., Van Jaarsveld H. A., Sauter F. J., Struijs J., Van Wijnen H. J. and Van de Meent D. (2008) European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment. *In: Atmos Environ*, **42**, pp. 441-453.
- WMO 2014 WMO (2014) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. World Meteorological Organisation, Geneva.
- Zampori & Pant 2019 Zampori L. and Pant R. (2019) Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, Luxembourg, retrieved from: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PEF_method.pdf.
- Zebisch 2018 Zebisch M. V., Rita; Niedrist, Georg; Schneiderbauer, Stefan; Streifeneder, Thomas; Weiß, Martin; Troi, Andrea; Renner, Katja und weitere (2018) Klimareport. Südtirol 2018. *In: Eurac Research*, pp., retrieved from: <https://webassets.eurac.edu/31538/1618826782-klimareport-2018-de.pdf>.

A. Anhang Bewertungsmethode PEF - Europäischer Umweltfußabdruck (2018)

Die Environmental Footprint (EF) Methode wird von der EF-Initiative der Europäischen Kommission zur Bewertung von Umweltauswirkungen von Produkten und Organisationen entwickelt und empfohlen. Sie ist damit auf die Anwendung als Informationsquelle für Konsumierende angepasst. Auch für die B2B Kommunikation im Rahmen von Umweltdeklarationen wird diese Methode und ihre Wirkungskategorien in Europa angewandt (European Committee for Standardisation (CEN) 2022). Die derzeitige Version in SimaPro basiert auf der Environmental Footprint Methode 3.1²¹. Sie enthält Vorschläge zur Normierung und Gewichtung.

A.1 Charakterisierungsmodelle

Die Charakterisierungsmodelle sind in einer Publikation zusammengefasst (Andreasi Bassi et al. 2023). Tab. 9.1 zeigt eine Beschreibung der berücksichtigten Wirkungskategorien. Ein detaillierter Beschrieb der berücksichtigten Wirkungskategorien folgt in den Unterkapiteln.

Die Robustheit und Zuverlässigkeit der Indikatoren werden zusätzlich beschrieben, wobei I für eine gute Robustheit und Zuverlässigkeit stehen und III für eine geringere Robustheit. Die Robustheit ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Als Beispiel wird ein Indikator hinsichtlich seiner Robustheit beschrieben (Zampori & Pant 2019).

²¹ <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>

Tab. 9.1 In der EF-Methode verwendete (midpoint-)Wirkungskategorien (Andreasi Bassi et al. 2023).

Wirkungskategorie	Modell zur Wirkungsanalyse	Indikator Einheit	Quelle	Robustheit
Klimawandel	Strahlungsantrieb als globales Erwärmungspotenzial über einen Zeithorizont von 100 Jahren	kg CO ₂ eq	IPCC 2021 + JRC Anpassungen	I
Ozonabbau	EDIP-Modell basierend auf den ODPs der World Meteorological Organization (WMO) über einen Zeithorizont von 100 Jahren	kg CFC-11 eq	WMO 2014 + andere Quellen	I
Ionisierende Strahlung	Modell zur Auswirkung auf die menschliche Gesundheit	kg U ²³⁵ eq	Frischknecht et al. 2000	II
Photochemische Ozonbildung	LOTOS-EUROS-Modell	kg NMVOC eq	Van Zelm et al. 2008 wie in ReCiPe	II
Feinstaub	Krankheitsinzidenz-Modell	Inzidenz der Krankheit	Fantke et al. 2016	I
Humantoxizität, nicht Krebs	USEtox® 2.1	CTUh	Fantke et al. 2017 Rosenbaum et al. 2008 wie in Saouter et al. 2018	III
Humantoxizität, Krebs	USEtox® 2.1	CTUh	Fantke et al. 2017 Rosenbaum et al. 2008 wie in Saouter et al. 2018	III
Versauerung	Kumuliertes Überschreitungsmodell	mol H ⁺ eq	Posch et al. 2008 Seppälä et al. 2006	II
Eutrophierung, Süßwasser	EUTREND-Modell	kg P eq	Struijs et al. 2009 wie in ReCiPe	II
Eutrophierung, Meer	EUTREND-Modell	kg N eq	Struijs et al. 2009 wie in ReCiPe	II
Eutrophierung, terrestrisch	Kumuliertes Überschreitungsmodell	mol N eq	Posch et al. 2008 Seppälä et al. 2006	II
Ökotoxizität, Süßwasser	USEtox® 2.1	CTUe	Fantke et al. 2017 Rosenbaum et al. 2008 wie in Saouter et al. 2018	III
Landnutzung	Bodenqualitätsindex wie im LANCA-Modell und LANCA CF version 2.5	Punkte	De Laurentiis et al. 2019; Horn et al. 2018	III
Wassernutzung	AWARE-Modell	m ³ entzogen	Boulay et al. 2018	III
Ressourcennutzung, Fossil	CML-Modell	MJ eq	van Oers et al. 2002	III
Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle	Ultimate-Reserves-Modell	kg Sb eq	van Oers et al. 2002	III

A.2 Klimawandel

Wirkungsindikator: Klimaänderungspotential über 100 Jahre (kg CO₂-eq.). Auf Basis des Baseline-Modell des IPCC 2013 2021 und weitere zusätzliche Faktoren. Berechnet durch die Forschungsstelle der Europäischen Kommission (IPCC 2013 2021 + JRC Anpassungen).²².

A.3 Ozonabbau

Das Ozonabbaupotenzial (ODP) berechnet die zerstörerischen Auswirkungen auf die stratosphärische Ozonschicht über einen Zeithorizont von 100 Jahren. Die stratosphärische Ozonschicht reduziert die Menge an UV-Strahlung, die die Erdoberfläche erreicht und Schäden für Menschen, Tiere, Pflanzen und Materialien verursachen kann (WMO 2014).

A.4 Ionisierende Strahlung

Wirkungsindikator: Menschliche Expositionseffizienz bezogen auf Uranium-235 (Frischknecht et al. 2000).

A.5 Photochemische Ozonbildung

Ozon und andere reaktive Sauerstoffverbindungen werden als sekundäre Schadstoffe in der Troposphäre (nahe der Erdoberfläche) gebildet. Ozon wird durch die Oxidierung der primären Schadstoffe VOC (flüchtige, organische Verbindungen) oder CO (Kohlenstoffmonoxid) in der Anwesenheit von NO_x (Stickoxide) unter Einfluss von Licht gebildet.

Wirkungsindikator: Das Ozonbildungspotential beschreibt den potenziellen Beitrag zur photochemischen Bildung von Ozon in der unteren Atmosphäre.

Die Methode verwendet räumliche Differenzierung und ist nur für Europa gültig. Das LOTOS-EUROS Modell mittelt über 14'000 Rasterzellen bei einer marginalen Erhöhung der Ozonbildung, um die Europäischen Faktoren zu berechnen (Van Zelm et al. 2008).

A.6 Feinstaub

Wirkungsindikator: Krankheitsvorfälle pro Kilogramm PM_{2.5} emittiert.

Der Indikator wird mit der mittleren Steigung zwischen dem Arbeitspunkt der „Emission Response Function“ (ERF) und des theoretischen minimalen Risikolevel abgeschätzt. Die Belastungsmodelle basieren auf Archetypen, welche die urbane und ländliche Umwelt, sowie deren Innenbereiche von Gebäuden einbeziehen (Fantke et al. 2016).

A.7 Humantoxizität, nicht Krebs

Wirkungsindikator: Vergleichbare Toxizitätseinheit für Menschen (Comparative Toxic Unit for human, CTUh) drückt den erwarteten Anstieg der Sterblichkeit in der Gesamtbevölkerung pro Masseinheit einer emittierten Chemikalie aus (Fälle pro Kilogramm Emission).

Das hierfür verwendete Modell ist das USEtox Konsens-Modell (Multimedia Modell). Keine räumliche Differenzierung nebst Kontinenten und Weltregionen. Spezifische Gruppen von Chemikalien bedürfen weiterer Bearbeitung (Fantke et al. 2017 ; Rosenbaum et al. 2008).

²² Zusätzliche Erläuterungen siehe Kapitel zu Klimawandel in <https://www.esu-services.ch/fileadmin/download/ten-der/ESU-Beschreibung-Bewertungsmethoden.pdf>

A.8 Humantoxizität, Krebs

Wirkungsindikator: Vergleichbare Toxizitätseinheit für Menschen (Comparative Toxic Unit for human, CTUh) drückt den erwarteten Anstieg der Sterblichkeit in der Gesamtbevölkerung pro Masseinheit einer emittierten Chemikalie aus (Fälle pro Kilogramm Emission).

Das hierfür verwendete Modell ist das USEtox Konsens-Modell (Multimedia Modell). Keine räumliche Differenzierung nebst Kontinenten und Weltregionen. Spezifische Gruppen von Chemikalien bedürfen weiterer Bearbeitung (Fantke et al. 2017 ; Rosenbaum et al. 2008).

A.9 Versauerung

Diese Wirkungskategorie beschreibt mögliche Auswirkungen auf Boden und Süßwasser, die durch den Eintrag bestimmter Schadstoffe aus der Luft sauer werden. Wenn Säuren freigesetzt werden, sinkt der pH-Wert und der Säuregehalt steigt, was zum Beispiel zu einem weit verbreiteten Rückgang von Nadelwäldern und toten Fischen in Seen in Skandinavien führen kann.

Wirkungsindikator: Kumulative Überschreitungen. Charakterisiert die Veränderung der kritischen Belastungsüberschreitung in empfindlichen Bereichen von terrestrischen und Frischwasser Ökosystemen, in welchen sich versauernde Substanzen ablagern (Posch et al. 2008; Seppälä et al. 2006).

A.10 Eutrophierung bzw. Überdüngung

Ökosysteme werden durch Stoffe beeinflusst, die Stickstoff oder Phosphor enthalten (z.B. Gülle oder Dünger). Die Folgen der Nährstoffanreicherung sind eine erhöhte Biomasseproduktion (organische Substanz) und eine verminderte Biodiversität, die sich aus dem vermehrten Wachstum der relativ wenigen Arten ergibt, die in der Lage sind, die erhöhte Menge an Nährstoffen zu nutzen. Beispiele sind die Algenblüte in aquatischen Ökosystemen auf Kosten derjenigen Arten, die in einer nährstoffarmen Umgebung gedeihen. Ein beträchtliches Algenwachstum führt zum Verschwinden höherer Pflanzen, und der Abbau abgestorbener Algen führt zu einem Sauerstoffmangel, der die Menge der sauerstoffintensiveren Wassertiere (z.B. Speisefische) beeinträchtigen kann (Posch et al. 2008; Seppälä et al. 2006; Struijs et al. 2009).²³

A.10.1 Süßwasser

Wirkungsindikator: Phosphoräquivalente: Drückt aus, zu welchem Grad die emittierten Nährstoffe in das Kompartiment Frischwasser gelangen (Phosphor wird als limitierender Faktor im Frischwasser betrachtet). Gültig für Europa. Durchschnittliche Charakterisierungsfaktoren von länderabhängigen Charakterisierungsfaktoren (Struijs et al. 2009).

A.10.2 Meer

Wirkungsindikator: Stickstoffäquivalente: Drückt aus, zu welchem Grad die emittierten Nährstoffe ins Meer gelangen. Stickstoff wird als limitierender Faktor im Meer betrachtet (Struijs et al. 2009).

A.10.3 Terrestrisch

Wirkungsindikator: Kumulative Überschreitungen. Charakterisiert die Veränderung der kritischen Belastungsüberschreitung in empfindlichen Bereichen von terrestrischen Ökosystemen, in welchen sich eutrophierende Substanzen ablagern (Posch et al. 2008; Seppälä et al. 2006).

²³ https://qpc.adm.slu.se/7_LCA/page_09.htm

A.11 Ökotoxizität, Süßwasser

Wirkungsindikator: Vergleichbare Toxizitätseinheit für Ökosysteme (Comparative Toxic Unit for ecosystems, CTUe) drücken eine Abschätzung der potenziell betroffenen Fraktionen von Spezies (potentially affected fraction of species, PAF) integriert über Zeit und Volumen pro Masseinheit einer emittierten Chemikalie aus (PAF m³ year/kg).

Das hierfür verwendete Modell ist das USEtox Konsens-Modell (Multimedia Modell). Keine räumliche Differenzierung nebst Kontinenten und Weltregionen. Spezifische Gruppen von Chemikalien bedürfen weiterer Bearbeitung (Fantke et al. 2017 ; Rosenbaum et al. 2008).

A.12 Landnutzung

Wirkungsindikator: Bodenqualitätsindex

Charakterisierungsfaktor-Sets wurden von der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission vom LANCA® v 2.5 als Basismodell ausgehend neu berechnet. Von ursprünglich 5 Indikatoren wurden nur 4 in die Aggregation übernommen. Die mechanisch-chemische Filtration wurde aufgrund der hohen Korrelation mit mechanischer Filtration ausgeschlossen (De Laurentiis et al. 2019; Horn et al. 2018)

A.13 Wassernutzung

Wirkungsindikator: m³ Wasseräquivalente, die dem Einzugsgebiet entzogen werden.

Mit der Methode AWARE (Relative Available Water Remaining) wird die zur natürlichen Nutzung verbleibende Wassermenge für verschiedene Einzugsgebiete abgeschätzt, nachdem der Bedarf von Menschen und aquatischen Ökosystemen gedeckt ist (Boulay et al. 2018).

Mit dem Update auf ecoinvent 3.10 wurden neue Prozesse zur Sickerwasserbehandlungen in den Deponiedatensätze verwendet (FitzGerald et al. 2023). Da diese Datensätze nicht den Regenwasserzufluss berücksichtigen, sondern nur das nach der Behandlung in ein Gewässer abgegebene Wasser, ist ihre Wasserbilanz nicht geschlossen. Daher ist der Indikator für entzogenes Wasser negativ, wenn er mit der ursprünglichen Wirkungsbewertungsmethode EF 3.1/EN15804+A2 berechnet wird. Um diese falschen Ergebnisse zu vermeiden, hat ESU-services einen zusätzlicher Indikator für entzogenes Wasser hinzugefügt. Dieser Indikator folgt dem Ansatz von ecoinvent: „Das Problem mit Wasser ist ähnlich wie mit der Kohlenstoffbilanz: Die Zuteilung verzerrt die Bilanz und die einfache Anwendung positiver Charakterisierungsfaktoren auf den Wasserverbrauch und negativer Charakterisierungsfaktoren auf die Wasseremission zurück ins Wasser würde zu unzuverlässigen Wasserwerten führen. ecoinvent berichtet jedoch gewissenhaft über die Wasserverdunstung in die Luft. Diese Menge stellt das Wasser dar, das das Ökosystem verlässt, ohne für seine übliche Funktion zur Verfügung zu stehen, daher besteht der allgemeine Ansatz darin, (positive) Charakterisierungsfaktoren nur auf diese Elementarflüsse anzuwenden.“ (Sonderegger & Stoikou 2023, S. 22) Der angepasste Wassernutzungsindikator berücksichtigt nur die Wasserverdunstungsflüsse unter Verwendung der regionalisierten Charakterisierungsfaktoren der ursprünglichen Methoden für Wasserentnahmen aus nicht näher bezeichneter natürlicher Herkunft.

A.14 Ressourcennutzung, fossil

Wirkungsindikator: Abiotische Ressourcenaufzehrung von fossilen Energieträgern (ADP fossil); basiert auf unteren Heizwerten.

ADP für Energieträger, basierend auf van Oers et al. 2002 wie umgesetzt in CML, v. 4.8 (2016). Modell für die Entnahme basiert auf use-to-availability Verhältnis. Komplette Substitution unter verschiedenen Energieträgern ist angenommen (van Oers et al. 2002).

A.15 Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle

Wirkungsindikator: Abiotische Ressourcennutzung von Mineralien und Metallen (ADP ultimate reserve).

ADP für Mineralien und Metalle, basierend auf van Oers et al. 2002 wie umgesetzt in CML, v. 4.8 (2016). Nutzungs-Modell basiert auf use-to-availability Verhältnis. Komplette Substitution unter verschiedenen Mineralien ist angenommen (van Oers et al. 2002).

A.16 Langzeitemissionen

Die Belastungen durch Langzeitemissionen werden bei dieser Methode nicht berücksichtigt.

A.17 Normierung und Gewichtung

Die Normierung und Gewichtung für die EF-Methode werden in Tab. 9.2 gezeigt. Sie basiert auf folgenden Quellen:

- Normierung (Crenna et al. 2019)
- Gewichtung gemäss (Andreasi Bassi et al. 2023).

Tab. 9.2 Normierung und Gewichtung für die EF 3.1-Methode in SimaPro

Wirkungskategorien	Normalisierung	Normalisierung pro Person	Gewichtung
Eutrophierung, Meer	0.0512	19.5	3.0%
Eutrophierung, Süßwasser	0.622	1.60685	2.8%
Eutrophierung, terrestrisch	0.00566	176.8	3.7%
Feinstaub	1680	0.00060	9.0%
Humantoxizität, Krebs	57961	0.00002	2.1%
Humantoxizität, nicht Krebs	7768	0.00013	1.8%
Ionisierende Strahlung	0.000237	4220	5.0%
Klimawandel	0.00013	7553	21.1%
Landnutzung	0.00000122	819498	7.9%
Ökotoxizität, Süßwasser	0.00002	56717	1.9%
Ozonabbau	19.1	0.05235	6.3%
Photochemische Ozonbildung	0.02447	40.85920	4.8%
Ressourcennutzung, fossil	0.00002	65004	8.3%
Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle	15.7	0.06362	7.6%
Versauerung	0.01800	55.56954	6.2%
Wassernutzung	0.00009	11468.7	8.5%

B.Circular Footprint Formula

B.1 Einführung

Die CFF ist ein Allokationskriterium, das für das Recycling von Produkten verwendet werden kann und einen standardisierten Ansatz zur Aufteilung der ökologischen Vorteile und Belastungen zwischen dem Lieferanten und dem Nutzer von recycelten Materialien bietet. Eine detaillierte Beschreibung der Anwendung der CFF findet sich im JRC Technical Report zur PEF-Methode (Zampori &

Pant 2019). Fig. 9.1 beschreibt die CFF als eine Kombination aus **LCIs** für Material, Energie und Entsorgung.

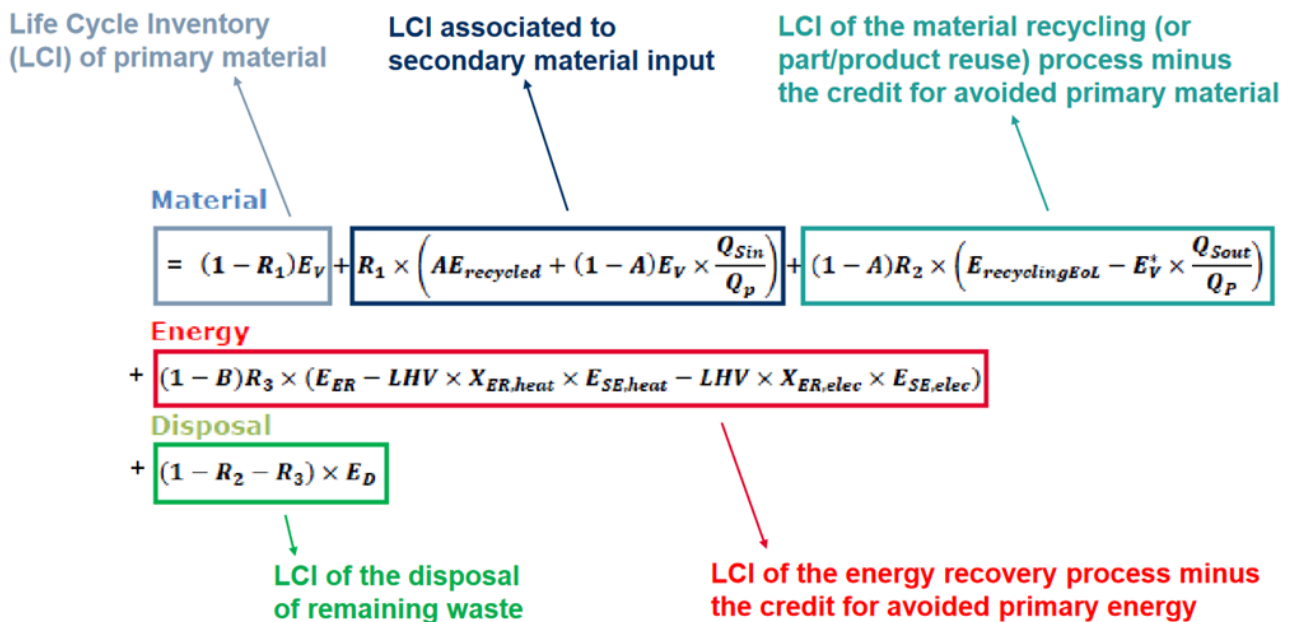


Fig. 9.1 Beschreibung der CFF (Zampori & Pant 2019).

Die folgende Liste enthält eine Beschreibung der verschiedenen Parameter der CFF:

- **A:** Allokationsfaktor zur Verteilung von Belastungen und Gutschriften zwischen Lieferanten und Nutzer von recycelten Materialien.
- **B:** Allokationsfaktor für Energiegewinnungsprozesse, der sowohl für Belastungen als auch für Gutschriften gilt.
- **Qsin:** Qualität des eingehenden Sekundärmaterials, d. h. die Qualität des recycelten Materials am Substitutionspunkt.
- **Qsout:** Qualität des ausgehenden Sekundärmaterials, d. h. die Qualität des recycelbaren Materials am Substitutionspunkt.
- **Qp:** Qualität des Primärmaterials, also die Qualität des Rohmaterials.
- **R1:** Anteil des Materials im Produktionsinput, das aus einem vorherigen System recycelt wurde.
- **R2:** Anteil des Materials im Produkt, das in einem nachfolgenden System recycelt (oder wiederverwendet) wird. R2 berücksichtigt Ineffizienzen in der Sammlung und im Recyclingprozess und wird am Ausgang der Recyclinganlage gemessen.
- **R3:** Anteil des Materials im Produkt, das am End-of-Life (EoL) zur Energierückgewinnung genutzt wird.
- **Erecycled (Erec):** Spezifische Emissionen und Ressourcenverbräuche (pro Analyseeinheit) aus dem Recyclingprozess des recycelten (wiederverwendeten) Materials, einschließlich Sammlung, Sortierung und Transport.
- **ErecyclingEoL (ErecEoL):** Spezifische Emissionen und Ressourcenverbräuche (pro Analyseeinheit) aus dem Recyclingprozess am EoL, einschließlich Sammlung, Sortierung und Transport.

- **Ev**: Spezifische Emissionen und Ressourcenverbräuche (pro Analyseeinheit) aus der Gewinnung und Vorverarbeitung von Rohmaterial.
- **E*v**: Spezifische Emissionen und Ressourcenverbräuche (pro Analyseeinheit) aus der Gewinnung und Vorverarbeitung von Rohmaterial, das durch recycelbares Material ersetzt wird.
- **EER**: Spezifische Emissionen und Ressourcenverbräuche (pro Analyseeinheit) aus dem Energiegewinnungsprozess (z. B. Müllverbrennung mit Energierückgewinnung, Deponierung mit Energierückgewinnung etc.).
- **ESE,heat und ESE,elec**: Spezifische Emissionen und Ressourcenverbräuche (pro Analyseeinheit), die durch die Substitution einer bestimmten Energiequelle (Wärme bzw. Strom) vermieden würden.
- **ED**: Spezifische Emissionen und Ressourcenverbräuche (pro Analyseeinheit) aus der Entsorgung von Abfallmaterial am EoL des analysierten Produkts, ohne Energierückgewinnung.
- **XER,heat und XER,elec**: Effizienz des Energiegewinnungsprozesses für Wärme bzw. Strom.
- **LHV**: Unterer Heizwert des Materials im Produkt, das zur Energierückgewinnung genutzt wird.

Die in Anhang C der PEF-Methode angegebenen Standardkoeffizienten wurden verwendet (European Commission 2021).

B.2 In dieser Studie verwendete Parameterwerte

Die folgenden Tab. 9.3 und Tab. 9.4 zeigen die Parameter und Prozesse, die zur Modellierung der CFF verwendet werden. Einige der Parameter wurden gemäß den standardmäßigen, anwendungsspezifischen und materialspezifischen Werten ausgewählt, die aus den ergänzenden PEF-Informationen (Anhang C des PEF-Dokuments) entnommen wurden, während andere auf bereits in der Studie beschriebenen Informationen basieren. Da eine Recyclingrate von 100% angenommen wird, ist nur der letzte Teil der CFF relevant, weshalb nicht alle Parameter der Formel gebraucht werden. Durch eine hundert Prozentige Recyclingrate werden die Parameter R1 und R3 auf null gesetzt, weshalb nur noch der letzte «disposal» Teil der Formel übrig bleibt.

Der Substitutionspunkt der CFF ist für Holz/sortiertes Altpapier bzw. für LDPE/recyceltes LDPE jeweils der Punkt vor dem Eintritt in die Fabrik.

Tab. 9.3 In dieser Studie verwendete Parameter für die CFF.

Material	A	Qsout/Qp	R2 laut Bundesbank	R2 aus Tabelle	R1	R3
Aluminium	0.2	1	1	0.6	0	0
Holz	0.8	1	1	0.3	0	0
Papier/Pappe	0.2	0.85	1	0.75	0	0
Plastic (PE)	0.5	0.75	1	0	0	0

Tab. 9.4 In dieser Studie verwendeten Datensätze für die CFF

Material	Datensatz für Recycling	Datensatz für ersetztes Material
Aluminium	Recycling of aluminium into aluminium ingot - from post-consumer {EU+EFTA+UK} collection, transport, pretreatment, remelting production mix, at plant aluminium waste, efficiency 90% LCI result	Aluminium ingot mix (high purity) {EU+EFTA+UK} primary production, aluminium casting single route, at plant 2.7 g/cm ³ , >99% Al LCI result
Holz	Chips production {EU+EFTA+UK} service production mix, at plant service, for 1 kg of output LCI result	Wood residues, hardwood {EU+EFTA+UK} technology mix production mix, at forest measured as dry mass LCI result
Papier/Pappe	Bleached kraft pulp, softwood {EU+EFTA+UK} technology mix production mix, at plant dry mass 0.9, carbon content, non-fossil 0.494 LCI result	Carton board {EU+EFTA+UK} Kraft Pulping Process, pulp pressing and drying, box manufacturing production mix, at plant 280 g/m ² LCI result
Plastic (PE)	Plastic granulate secondary, PE {EU+EFTA+UK} from post-consumer waste, via washing, granulation, pelletization production mix, at plant 90% recycling rate LCI result	PE granulates {EU+EFTA+UK} Polymerisation of ethylene production mix, at plant 0.91- 0.96 g/cm ³ , 28 g/mol per repeating unit LCI result

C.Anhang Bevölkerungszahl

Daten zur Bevölkerungszahl, die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurden.

TIME	2019																					
GEO (Labels)																					Population under 18 years	Population over 18 years
Euro area - 19 countries (2015-2022)	341'524'067 bep	3'115'197	3'216'693	3'300'178	3'315'706	3'360'730	3'344'903	3'432'047	3'470'684	3'548'446	3'548'145	3'608'118	3'550'337	3'549'482	3'523'136	3'538'507	3'528'298	3'530'489	3'570'630	58'936'529	282'587'538	
Germany	83'019'213	783'978	796'374	802'651	776'763	766'631	739'729	736'749	720'613	738'238	726'909	746'345	741'530	726'923	735'760	751'622	752'351	766'517	787'745	13'597'428	69'421'785	
Special value																						
:	not available																					
Available flags:																						
bep	break in time series, estimated, provisional																					

D. Gutachten über die Kritische Prüfung durch Dr. Conrad Spindler, Greendelta, Berlin



Externes kritisches Gutachten

Product Environmental Footprint (PEF)-Studie für Euro-Banknoten als Zahlungsmittel im Bargeldkreislauf für Deutschland

Datum: 7. November 2025
Author: Dr. Conrad Spindler
Kontakt: GreenDelta GmbH
Alt-Moabit 130
DE-10557 Berlin, Germany
gd@greendelta.com

GreenDelta

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund	3
2	Standards und Anforderungen	4
3	Ablauf der kritischen Prüfung.....	5
4	Ergebnis der kritischen Prüfung	7
4.1	Schlussfolgerung.....	7
4.2	Unabhängigkeit des Prüfers	9

1 Hintergrund

ESU-Services hat im Auftrag der Deutschen Bundesbank eine PEF-Studie (Product Environmental Footprint) mit dem Titel "Product Environmental Footprint (PEF)-Studie für Euro-Banknoten als Zahlungsmittel im Bargeldkreislauf für Deutschland" in deutscher Sprache erstellt. Die Studie wurde gemäß den Normen ISO 14040/44 für Ökobilanzen und den Anforderungen für PEF-Studien erstellt. Letztere umfassen die PEF-Methode, die PEF-Datenbank und die Regeln der "Empfehlung zur Anwendung von Environmental-Footprint-Methoden" der Europäischen Kommission. Der Auftraggeber und Auftragnehmer haben eine externe kritische Prüfung beauftragt, welche von einem externen Experten durchgeführt wird.

Die Studie dient ausschließlich Informationszwecken. Sie wurde für die Arbeit des Auftraggebers erstellt und soll in ihrer aktuellen Form veröffentlicht werden. Die Studie lässt keine vergleichenden Aussagen zu. Darüber hinaus erfolgt die Studie in enger Anlehnung an die Ziele und dem Umfang der "Product Environmental Footprint study of euro banknotes as a payment instrument", welche von der Europäischen Zentralbank im Dezember 2023 veröffentlicht wurde.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die wichtigsten Merkmale der Studie und der kritischen Prüfung.

Tabelle 1: Zusammenfassung wichtiger Merkmale der Studie und der kritischen Prüfung

Titel	Product Environmental Footprint (PEF)-Studie für Euro-Banknoten als Zahlungsmittel im Bargeldkreislauf für Deutschland
Version	Finale Version 29. Oktober 2025
Auftraggeber	Deutsche Bundesbank, Herriotstraße 4, 60528 Frankfurt am Main Fachstelle: Anke Deinzer (Bereich: Nachhaltigkeit im Bargeldkreislauf) https://www.bundesbank.de
Auftragnehmer	ESU-services GmbH, Vorstadt 10, CH-8200 Schaffhausen https://www.esu-services.ch
Ersteller (Autoren)	Niels Jungbluth und Angelo Stefanel

Gutachter (Reviewer)	Conrad Spindler, GreenDelta GmbH, Alt-Moabit 130, D-10557 Berlin
Art der Prüfung	Kritische Überprüfung durch einen externen, unabhängigen Experten zum Ende der Studie
Prüfung umfasst LCI	Ja
Prüfung umfasst LCIA	Ja
Veröffentlichung	Ja
Vergleichende Aussagen	Nein
Themengebiet	Finanzen / Bargeldzahlungen Deutschland
Umfang (Scope)	Cradle-to-grave, ohne Produktion der Banknoten
Funktionelle Einheit	Durchschnittliche jährliche Barzahlung einer Person im Jahr 2019 in Deutschland
Standards und Anforderungen	ISO 14040, ISO 14044, PEF-Methode (Empfehlung der Kommission (EU) 2021/2279)
Software	SimaPro 10.2 (2025)
Hintergrund-Datenbank	EF 3.1 Datenbank (SimaPro Implementierung)
Wirkungsmethode	EF 3.1 Methode (SimaPro Implementierung)

2 Standards und Anforderungen

Die kritische Prüfung erfolgte gemäß ISO 14040 und ISO 14044 sowie gemäß den kritischen Prüfungsverfahren der ISO 14071. Wie in ISO 14044:2006, 6.1 dargelegt, muss der kritische Überprüfungsprozess folgendes sicherstellen:

- die zur Durchführung der Ökobilanz verwendeten Methoden stimmen mit Anforderungen von ISO 14040 und ISO 14044 überein;
- die zur Durchführung der Ökobilanz verwendeten Methoden sind wissenschaftlich und technisch valide;
- die verwendeten Daten sind im Hinblick auf das Ziel der Studie angemessen und nachvollziehbar;
- die Interpretationen spiegeln die identifizierten Einschränkungen und das Ziel der Studie wider;
- der Bericht der Studie ist transparent und konsistent.

Ebenfalls wird in ISO 14040:2006, 7.1 erläutert, dass eine kritische Prüfung weder die vom Auftraggeber der Ökobilanzstudie gewählten Ziele, noch die Art und Weise wie die Ökobilanzergebnisse verwendet werden, verifizieren oder validieren kann. Ob eine kritische Prüfung parallel oder am Ende der Ökobilanzstudie durchgeführt wird, ändert nichts an den Ergebnissen des Prozesses der kritischen Prüfung.

Zusätzlich wurden mit dieser kritischen Prüfung die Anforderungen an eine PEF-Studie gemäß den "Verifizierungs- und Validierungsanforderungen" in Abschnitt 8.4 des Anhang I der "Empfehlung (EU) 2021/2279 der Kommission vom 15. Dezember 2021 zur Anwendung der Methoden für die Berechnung des Umweltfußabdrucks zur Messung und Offenlegung der Umweltleistung von Produkten und Organisationen entlang ihres Lebenswegs" überprüft. Es wurde eine Prüfung der Charakterisierungsfaktoren, der Normalisierungsfaktoren und der Gewichtungsfaktoren der Daten vorgenommen und die Prüfung umfasste auch eine Beurteilung des Sachbilanzmodells und der erstellten, einzelnen Vordergrund-Datensätze.

3 Ablauf der kritischen Prüfung

Der Ablauf der kritischen Prüfung verlief in sehr guter und offener Zusammenarbeit der Beteiligten. Benötigte Dokumente der Studie, Excel-Tabellen für Berechnungen, Prozessinventare, sowie SimaPro-Datenbanken und -Methoden wurden ausgetauscht. Nach einer Überprüfungsrunde wurden alle benötigten Korrekturen transparent durchgeführt oder gegebenenfalls diskutiert. Kommentare und Antworten wurden tabellarisch erfasst und archiviert. Der Ablauf der kritischen Prüfung ist im Folgenden zusammengefasst.

- (1) Die erste Version des Reports und die Daten zur kritischen Prüfung gingen am 07.05.2025 beim Gutachter ein. Eine zweite, leicht aktualisierte Version des Berichts wurde am 12.05.2025 versendet und bildete die Grundlage für die erste Runde der kritischen Prüfung.
- (2) Die Kommentare und Korrekturen der ersten Überprüfung wurden am 23.05.2025 an die Ersteller der Studie zurückgesendet. Am 26.05.2025 fand ein Online-Meeting zwischen dem Gutachter, dem Auftraggeber und den Erstellern der Studie statt, um Verbesserungsvorschläge zu besprechen und zu diskutieren.
- (3) Am 10.06.2025 ging die dritte Version des Reports beim Gutachter ein, und am 16.06.2025 folgte eine vierte Version mit Korrekturen. Beide Reports bildeten die Grundlage für die zweite Runde der kritischen Prüfung.

- (4) Am 24.06.2025 wurden für die Verifizierung der Daten die korrigierten Vordergrund-Prozesse des Modells in der letzten Version im CSV-Format ausgetauscht.
- (5) Am 29.10.2025 wurde die finale Fassung von der Bundesbank bestätigt, wobei einige formale Anpassungen und Formulierungen vorgenommen wurden.
- (6) Es wurden keine weiteren Versionen der Studie erstellt, und die Resultate der kritischen Prüfung basieren auf der letzten Version des Reports vom 29.10.2025 (ESU-2025-LCA-Bargeldumlauf-DE-final.pdf), sowie der LCA-Dateien zur Modellierung vom 24.06.2025.

4 Ergebnis der kritischen Prüfung

4.1 Schlussfolgerung

In Übereinstimmung mit ISO 14071, wurde die kritische Prüfung auf Grundlage des abschließenden Ökobilanzberichts erstellt. Die in Tabelle 1 dargestellte, geprüfte PEF-Studie entspricht den Anforderungen der ISO-Normen 14040 und 14044. Die relevanten PEF-Modellierungsregeln, Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren und alle relevanten Charakterisierungsfaktoren in den Wirkungskategorien erfüllen die Anforderungen der PEF-Methode. Ich empfehle, den gesamten Bericht einschließlich dieses Gutachtens öffentlich zugänglich zu machen.

Ziel und Umfang der Studie sind klar definiert und orientieren sich an einer früheren Studie der Europäischen Zentralbank mit dem Titel "Product Environmental Footprint Study of Euro Banknotes as a Payment Instrument". Die hier vorliegende Studie verwendet andere Systemgrenzen als die Studie der EZB, da die Produktion der Banknoten nicht mit einbezogen wurde. Dies ändert allerdings nichts an den Schlussfolgerungen und Empfehlungen der Studie, da der Fokus des Ziels und Umfangs auf den Barzahlungen liegt, einschließlich der Vertriebs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase.

Die verwendeten Methoden sind wissenschaftlich und technisch valide. Die verwendeten Daten sind im Hinblick auf Ziel und Umfang der Studie angemessen und sinnvoll. Die Studie ist sehr gut strukturiert und enthält alle benötigten Beschreibungen der Modellierung, der verwendeten Daten und der zugrunde liegenden Parameter in transparenter Art und Weise.

Positiv hervorzuheben sind auch die identifizierten und genannten Handlungsempfehlungen, in Kombination mit drei verschiedenen Sensitivitätsanalysen und zwei Szenarioanalysen für Energie und Transport. Es wird direkt ersichtlich, dass die Verteilungsphase mit den Transportfahrzeugen von den NZB-Filialen zu den Kreditinstituten, sowie der Stromverbrauch der Geldautomaten die mit Abstand dominantesten Einflussgrößen der PEF-Studie sind.

Eine Verbesserung der Genauigkeit der Daten in zukünftigen Studien könnte durch die direkten Messungen des Kraftstoffverbrauchs/Tankverlaufs der Transporter erreicht werden. Es ist allerdings anzunehmen, dass diese direkten Messungen einen erheblich höheren Mehraufwand verursachen und die Handlungsempfehlungen zur Elektrifizierung der Flotte nicht beeinflussen.

Auch eine umfangreichere, statistische Erfassung des Stromverbrauchs einer Vielzahl unterschiedlicher Geldautomaten könnte die Genauigkeit der signifikantesten Daten deutlich erhöhen. Aber in diesem Fall wäre anzunehmen, dass die Unsicherheiten der resultierenden Umwelteinflüsse aus diesen Daten weiterhin von den veralteten Strommixen der verpflichtenden EF-Datensätzen dominiert sind.

Eine Einschränkung der Studie sind die relativ alten und überholten EF-Hintergrunddatensätze. Dieser Punkt stellt einen allgemeinen Mangel der EF-Datenbank dar und liegt nicht in der Verantwortung der Ersteller oder der Auftraggeber der Studie. Es ist anzunehmen, dass die Verwendung der verpflichtenden EF-Datenbank für PEF-Studien die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit zwischen verschiedenen PEF-Studien erhöht, aber gleichzeitig auch zu höheren Unsicherheiten aufgrund von veralteten Datensätze führen kann. Ein Beispiel hierfür sind die sehr wichtigen Transportdatensätze, welche auf Emissionsquellen für Sattelzüge aus dem Jahr 2010 basieren, oder die Energiedatensätze mit dem Referenzjahr 2012 für den Strommix. Die Stromdatensätze können in PEF-Studien um den Faktor 2 höher sein als in aktuelleren Daten. Beispielsweise enthält der deutsche Strommix (Stromverbrauchsmix) von 2012 keine Photovoltaik und nur sehr geringe Mengen an Windkraft.

4.2 Unabhängigkeit des Prüfers

Ich, der Unterzeichner Dr. Conrad Spindler, erkläre hiermit Folgendes:

- Ich bin weder Voll- noch Teilzeitbeschäftigter des Auftraggebers oder Erstellers der Ökobilanzstudie.
- Ich war weder an der Festlegung des Umfangs noch an der Durchführung der vorliegenden Ökobilanzstudie beteiligt, d. h. ich gehörte nicht den Projektteams des Auftraggebers oder Erstellers an.
- Ich habe kein finanzielles, politisches oder sonstiges Interesse am Ergebnis der Studie.

Zu meinen für die vorliegende kritische Prüfung relevanten Kompetenzen gehören Kenntnisse und Fähigkeiten in:

- ISO 14040 und ISO 14044;
- Methodik und Praxis der Ökobilanz, insbesondere im Kontext der Sachbilanz;
- Praxis der Prüfung und Validierung;
- den für die Wirkungskategorien der Studie relevanten wissenschaftlichen Hintergrund, der eine sachgerechte Interpretation der Ökobilanzergebnisse ermöglicht;
- ökologische, technische und sonstige relevante Leistungsaspekte der bewerteten Produktsysteme;
- die für die Studie verwendete Sprache.

Ich erkläre, dass die obigen Angaben wahrheitsgemäß und vollständig sind.

Datum: 7. November 2025

Name: Dr. Conrad Spindler

Unterschrift:



E. Anhang Sachbilanzdaten in Excel (vertraulich)

In einer vertraulichen Excel Tabelle werden die Sachbilanzdaten vollständig dokumentiert und für das Review bzw. die Auftraggeber zur Verfügung gestellt. Die Tabelle enthält auch die von der EZB für die NZBen zur Verfügung gestellten Input-Tabelle. Informationen zu einzelnen Einträgen finden sich jeweils im entsprechenden General Comment Feld.

F. Anhang ESU-services GmbH

Dieses Dokument wurde von der ESU-services GmbH in Schaffhausen erstellt. Auf den folgenden Seiten stellen wir Ihnen [ESU-services](#) als Ihren Partner für Projekte im Bereich der Ökobilanzierung vor. Wenn Sie mit uns zusammenarbeiten möchten, können Sie einen [Termin für ein erstes Treffen vereinbaren](#). Sie sollten nach der Auswahl des Termins eine E-Mail mit einer Kalendereinladung und einem Teams-Link erhalten. Bitte überprüfen Sie Ihren Spam-Ordner, wenn Sie keine solche Einladung erhalten, oder kontaktieren Sie uns per [E-Mail](#).

F.1 Unsere Philosophie «fair consulting in sustainability»

Die [Hauptaktivitäten der Firma ESU-services GmbH, sind Forschung, Beratung, Daten, Review, Software und Ausbildung](#) im Bereich [Ökobilanzen](#) und anderer Lebenszyklus-Methoden wie Produktlinienanalyse, [Klimafussabdruck](#) oder [Wasserbilanzen](#). Dabei bilanziert unser Unternehmen alle Arten von Produkten, z.B. aus den Sektoren Nahrungsmittel, Energie, Baumaterialien, Geräte und Dienstleistungen. Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten beinhalten auch Pionierarbeit beim Weiterentwickeln methodischer Ansätze der Ökobilanzierung.

ESU-services wurde im Jahre 1998 gegründet. Der Name ESU steht für Energie-Stoffe-Umwelt. Unser Geschäftsführer [Niels Jungbluth](#) hat seine erste Ökobilanz bereits 1994 erstellt. In diesem Zeitraum wurden mehr als 400 Projekte von unseren [Mitarbeitenden](#) durchgeführt.

Fairness, Unabhängigkeit und Transparenz sind wesentliche Merkmale unserer Beratungsphilosophie. Wir arbeiten sachbezogen und führen unsere Analysen unvoreingenommen durch. Wir dokumentieren unsere Studien und Arbeiten transparent und nachvollziehbar. Damit ist es auch Aussenstehenden möglich, die Qualität unserer Arbeit jederzeit zu kontrollieren. Wir bieten eine faire und kompetente Beratung an, die es den Auftraggebern ermöglicht, ihre ökologische Performance zu kontrollieren und kontinuierlich zu verbessern. Auch für unsere [eigene Firmenpolitik](#) spielt Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle.

Zu unseren [Kunden](#) zählen verschiedene nationale und internationale Firmen vom Start-Up bis zu globalen Unternehmen, Verbände und Verwaltungen. Ebenso arbeiten wir in Forschungsprojekten mit Industriepartnern und Universitäten zusammen.

F.2 Breite Palette von Beratungsdienstleistungen

ESU-services bietet eine breite Palette von Beratungsdienstleistungen rund um das Thema Ökobilanzen an:

F.2.1 Beratung und Fallstudien zu Lebenszyklusanalysen:

- [Ökobilanzfallstudien](#) zu [Energiesystemen](#), [Biotreibstoffen](#), [Nahrungsmitteln](#), [Verpackungen](#), [Lebensstilen](#), [Verkehr](#), [Elektronik](#), [Materialien](#), [Bauprodukten](#), [Haustieren](#), [Kaffee](#), [Mahlzeiten](#), [Trinkwasser](#), [Schokolade](#) und vielen anderen Sektoren.
- Erstellung von [Umweltdeklarationen \(EPD\)](#)
- [Klimabilanzen \(CO₂-Fussabdruck von Produkten und Dienstleistungen\)](#)

- Bilanz der gesamten Umweltbelastungen oder Treibhausgasemissionen eines Unternehmens inklusive der Warenflüsse ([Ökobilanz einer Organisation](#)), evtl. gemäss Scope 1, 2 und 3
- Life cycle costing (LCC) - Kostenanalyse zu Inputs und Outputs im Lebensweg
- [Ökologische Input-Output Analyse](#)
- Angebote für weitere Methoden wie [Wasserbilanzen](#), Umwelt-Fussabdruck, Energieanalysen, Umweltbilanzen, ökologischer Fussabdruck oder Transportbilanzen.
- [Projektleitung](#) bei wegweisenden Ökobilanzprojekten wie [ecoinvent](#) und der "[Ökobilanz von Energieprodukten](#)".
- Material- und Substanzflussanalysen (MFA und SFA).
- Beratung zum Thema [Lebenszyklus und Lieferketten Management](#).
- Entwicklung von Bewertungsmethoden, z.B. [Methode der ökologischen Knappheit \(Umweltbelastungspunkte\) 2006](#).

F.2.2 Gut dokumentierte Sachbilanzdaten:

- Erhebung von [Hintergrunddaten](#) für die [ecoinvent Datenbank](#)
- [Datenerhebung](#) für Ökobilanzen gemäss der [ecoinvent Methodik](#), z.B. für [Nahrungsmittel](#) oder [Photovoltaik](#).
- Angebot und Verkauf von [Sachbilanzdaten](#) für verschiedene Bereiche wie [Nahrungsmittelproduktion und Konsum](#)
- [Berechnung](#) von Primärenergiefaktoren und anderen Emissionsindikatoren

F.2.3 Prüfung und Verifizierung von Ökobilanz, CO₂-Fussabdruck und Umweltdeklaration:

- [Kritische Prüfung](#) von Ökobilanzen gemäss [ISO 14040 und 14044](#) Normen
- Prüfung von CO₂-Bilanzen gemäss Greenhouse Gas Protocol oder ISO [14067](#) Norm
- Verifizierung von [Umweltdeklarationen gemäss EN 15804](#) z.B. für [EPD international](#)
- Beratung bei der Entwicklung von [Standards zur Ökobilanzierung](#)

F.2.4 LCA Software:

- Verkauf für die weltweit führende [Ökobilanz-Software SimaPro](#)
- [Automatisierung](#) der Erstellung von EPDs und Ökobilanzen
- Entwicklung einfacher Software-Lösungen in [Excel](#) und [Webrechner](#), mit Kennwerten z.B. für [Weihnachtsbäume](#)

F.2.5 Schulungen:

- Schulung für die weltweit führende [Ökobilanz-Software SimaPro](#)
- [Vorträge und Schulungen](#) zu den Ergebnissen von Ökobilanz Studien
- Organisation von Workshops, wie z.B. dem [Ökobilanz Diskussionsforum](#).
- Auf unserer Webseite finden Sie zudem [Neuigkeiten](#) und Infos zu [Veranstaltungen](#) zum Thema Ökobilanzen.

F.3 Erfahrenes Projektteam

Für ESU-services arbeiten verschiedene Expert:innen, die alle auf dem Gebiet der ökologischen Bewertung von Lebenszyklen erfahren sind. Ferner profitieren wir von einem grossen Netzwerk auf den für die Studie erforderlichen Gebieten. Zu Beginn des Projekts wird eine Person als Projektleiterin

oder Projektleiter ernannt. Er oder sie ist der Hauptansprechpartner für den Kunden. Je nach Erfahrung und Verfügbarkeit können weitere Mitarbeiter die Arbeit unterstützen. Die Gesamtaufsicht und Qualitätssicherung für dieses Projekt liegen beim Geschäftsführer und Inhaber Dr. Niels Jungbluth.

9.1.1 Dr. Niels Jungbluth, Geschäftsführer und Inhaber

Dr. Sc. Techn. ETH Zürich, Dipl.-Ing. TU Berlin

Dr. Niels Jungbluth ist seit 2006 Geschäftsführer und Inhaber der ESU-services GmbH. Seine Hauptarbeitsgebiete sind Ökobilanzen im Bereich [Ernährung](#), [Biomasse](#), [Energiesysteme](#), [Input-Output-Analysen](#) und [Ökologische Lebensstile](#). Ein weiterer wichtiger Bereich der Arbeit sind [kritische Prüfung, Validierung und Verifizierung von Ökobilanzen gemäss unterschiedlichen Normen und Standards](#). Er ist zugelassener [Einzelgutachter für EPD International](#) und [IBU Bau](#). Niels hat das [SimaPro Zentrum](#) und den [Datenverkauf](#) von ESU-services aufgebaut. Er ist Mitglied des Editorial Board des [International Journal of Life Cycle Assessment](#) und der [internationalen Konferenz zu Ökobilanzen für Nahrungsmittel](#).

Niels Jungbluth arbeitet seit dem Jahr 2000 bei ESU-services. Im Jahr 2006 gründete er zusammen Rolf Frischknecht die ESU-services GmbH. Im Jahr 2012 übernahm er dessen Geschäftsanteile.

Niels hat ein Doktorat in Ökobilanzen am Lehrstuhl Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften von Prof. Dr. R. Scholz (ETH Zürich) durchgeführt. Seine Dissertation zu den [Umweltfolgen des Nahrungsmittelkonsums](#) wurde mit dem Greenhirn Preis 1999/2000 für angewandte Umweltforschung des Öko-Instituts Freiburg ausgezeichnet. In seiner vorhergehenden Diplomarbeit im Studiengang [Technischer Umweltschutz](#) an der TU Berlin hat er eine [Ökobilanz für Kochbrennstoffe in Indien](#) erstellt.



9.1.2 Angelo Stefanel, Projektleiter

M.Sc. ETH Umweltingenieur

Angelo Stefanel ist im Jahr 2024 als Projektleiter für Ökobilanzen bei ESU-services eingestiegen. Angelo bringt umfangreiche Erfahrungen aus seinen bisherigen Rollen im Bereich Umwelttechnik und Nachhaltigkeit mit. Vor seinem Einstieg bei ESU-services entwickelte er im Rahmen seiner Masterarbeit bei ON Running AG ein parametrisiertes LCA-Modell für das chemische Recycling von Polyester, was seine Expertise in LCA-Methoden und Software wie SimaPro weiter vertiefte.

Zusätzlich zu seiner akademischen Ausbildung, einschließlich eines Masterabschlusses in Umweltingenieurwissenschaften von der ETH Zürich, verfügt Angelo über praktische Erfahrungen in der Entwicklung von Nachhaltigkeitsstrategien aus seinem Praktikum bei 50Hertz Transmission GmbH, wo er Lieferkettenanalysen durchführte und Energieaudits leitete. Sein unternehmerisches Engagement zeigt sich in der Gründung von "Bottle Drop - Natural Wine Taxi," einem Startup, das sich der Förderung nachhaltiger Praktiken durch emissionsfreie Weinlieferungen widmet.

Angelo freut sich darauf, seine Fähigkeiten und sein Wissen in seiner neuen Rolle bei ESU-services einzusetzen, wo er motiviert ist, zu LCA-Projekten in verschiedenen Sektoren beizutragen und mit Kunden und Partnern zusammenzuarbeiten, um nachhaltige Lösungen zu fördern.



F.4 Ökologische und soziale Verantwortung

Unsere Kunden sind in der Regel an einer umweltfreundlichen Beschaffung interessiert. Auch die hier angebotene Dienstleistung ist mit einer indirekten Umweltbelastung für den Auftraggeber verbunden. Wir zeigen Kennzahlen zur ökologischen Nachhaltigkeit und Informationen zu unserer sozialen Verantwortung in unserem [jährlich erscheinenden Umweltbericht](#) (Jungbluth & Solin 2024; PCR 2012). Die Daten, die für den Umweltbericht von ESU-services GmbH erhoben wurden, ermöglichen es uns, die Umweltbelastungen zur Bearbeitung jedes einzelnen Projektes auszuweisen. Weil Geschäftsreisen eine grosse Bedeutung haben, werden diese bei den durchschnittlichen Belastungen pro Beratungsstunde ausser Acht gelassen und stattdessen spezifisch pro Projekt erfasst. Tab. 9.5 zeigt die Umweltbelastungen eines Beispielprojektes auf. Auf Wunsch erstellen wir für unsere Auftraggeber auch eine Vorabschätzung oder eine kostenlose Endabrechnung der Umweltbelastungen, die durch das Projekt bei uns verursacht werden.

Tab. 9.5 Beispiel für die Umweltauswirkungen eines bei ESU-services durchgeführten Projektes

Umweltbelastung für das Gesamtprojekt		Aufwand	Treibhausgas-emissionen	Umweltbelastungspunkte 2021	Environmental Footprint 3.1
			kg CO2-eq	UBP'21	Points
Zeitbudget Beratung	d	12.3	42	98'169	6.2E-03
Bahnreisen, CH	km	100	1	3'050	8.7E-05
Bahnreisen, DE	km	500	15	31'121	1.5E-03
Flugreisen	km	-	-	-	-
Hotelübernachtungen	-	2	45	102'537	3.9E-03
Total			103	234'877	1.2E-02

© ESU-services 2024

F.5 Gemeinsame Werte in einem weltweiten Netzwerk

ESU-services arbeitet mit verschiedenen Beratungsfirmen aus dem [globalen SimaPro Netzwerk](#) zusammen. So können wir auch internationale Projekte erfolgreich durchführen und Kompetenzen vielen Fachbereichen zusätzlich anbieten. Dieses Netzwerk ermöglicht uns Sachbilanzdaten für Produkte und Dienstleistungen aus aller Welt zu erheben oder darauf zuzugreifen. Damit kann ESU-services auch auf die Bedürfnisse grosser Unternehmen eingehen. Wir teilen die folgenden ethischen Werte und Verpflichtungen mit diesem Netzwerk.



Wir vertrauen auf wissenschaftsbasierte Fakten, sind leidenschaftliche Mitarbeiter und helfen bei der Entwicklung nachhaltiger Lösungen. Unsere Werte und Überzeugungen stehen im Mittelpunkt unseres Handelns.

- Wir lieben den Planeten, er ist unser Zuhause.
- Wir arbeiten daran, seine Widerstandsfähigkeit durch nachhaltige Praktiken und verlässliche Kennzahlen zu erhalten.
- Lebenszyklusanalysen bilden den Kern von Nachhaltigkeitsbeurteilungen und sollen für alle zugänglich sein.
- SimaPro und Ökobilanz-basierte Entscheidungen werden in einem dynamischen Ökosystem, das eine Vielfalt von Welten, Systemen und Menschen verbindet, von zentraler Bedeutung sein.
- Innerhalb dieses Systems entwickeln wir gemeinsam mit Kunden, Partnern, Kleinunternehmen, Regierungsstellen, NGO's und anderen Interessengruppen praktikable Lösungen.