

**Elektronik
Verwertung
Altfahrzeuge**

Projekt EVA II

Ökobilanzmodul

Schlussbericht



Auftraggeber

Arbeitsgruppe Projekt EVA II:
AGVS, Altola AG, AMAG Import AG, auto-schweiz, AWEL, BAFU, Empa, Häfeli-Brügger AG, Kaufmann Recycling AG, SARS, Schaufelberger René Consulting GmbH, Thommen Furler AG, VASSO, Tesla

Begleitung Bundesamt für Umwelt: Isabelle Baudin

Bearbeitung

Empa, Technology and Society Lab, Critical Materials and Resource Efficiency Group, 9014 St. Gallen¹
Empa, Technology and Society Lab, Advancing Life Cycle Assessment Group, 9014 St. Gallen²

AutorInnen

Manuele Capelli¹
Charles Marmy¹
Roland Hischier²
Didier Beloin-Saint-Pierre²
Heinz Böni¹

Titelbild: ©C. Marmy, 2021

Hinweis

Diese Studie wurde mit finanzieller Unterstützung vom Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) durchgeführt. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich. Die Autoren bedanken sich herzlich bei Emma Faisandet und Prof. Manuele Margni (HES-SO Valais-Wallis) für ihre wertvollen Beiträge.

St. Gallen, Januar 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Eingebettete elektronische Geräte und ihre Klassifizierung	2
1.2	Seltene Technologiemetalle	5
1.3	Ziel des Projekts EVA II	6
1.4	Das Gesamtmodell	6
1.5	Ziel des Ökobilanzmoduls	10
2	Methodik	12
2.1	Ansatz	12
2.2	Struktur des Ökobilanzmoduls	13
2.3	Sachbilanz und Datenquellen	19
2.4	Mathematische Modellierung	23
2.5	Grenzen des Ökobilanzmoduls	25
3	Ergebnisse	27
3.1	Umwelteinflüsse der Szenarien "Baseline" und "EEG Ausbau"	27
3.2	Mögliche Weiterentwicklungen des Ökobilanzmoduls	36
4	Schlussfolgerungen	38
5	Referenzen	40
Anhang A	Liste der identifizierten Gerätetypen	41
Anhang B	Liste der EEG Bestandteile	51
Anhang C	Parameter aus dem Materialverwertungsmodul	58

Tabellen

Tabelle 1:	Gerätekategorien, ihrer typischen Bestandteile und Zusammensetzungen.....	4
Tabelle 2:	Auswahl relevanter STM in Fahrzeugen und deren typischen Anwendungen.....	5
Tabelle 3:	Im Modul berücksichtigte Materialien [2]	13
Tabelle 4:	Beschreibung der Szenarien.....	14
Tabelle 5:	Arten von Ökobilanzdaten.....	19
Tabelle 6:	Im Ökobilanzmodul involvierte Behandlungsprozesse (Datentyp A)	20
Tabelle 7:	Im Ökobilanzmodul involvierte Transportprozesse (Datentyp B)	21
Tabelle 8:	Beschreibung Massenanteile (Datentyp C) alle Werte in ANHANG C.....	21
Tabelle 9:	Im Ökobilanzmodul involvierte Prozesse der Primärproduktion der Materialien, zur Bestimmung des "avoided burden" (Datentyp D)	22
Tabelle 10:	Beschreibung Massenanteile (Datentyp E) alle Werte in ANHANG C	22
Tabelle 11:	Notationen für die Modulparameter	23
Tabelle 12:	Modulparameter	23
Tabelle 13:	Modellgleichungen Ökobilanzanalyse	24
Tabelle 14:	Umweltnutzen nach Szenario für die Gerätekategorien pro funktionelle Einheit	27
Tabelle 15:	Umweltnutzen pro Fahrzeug anhand vorhandener Masse pro Gerätekategorie	32
Tabelle 16:	Liste der Fokusgeräte vom Projekt EVA I, mit EVA II Nomenklatur benannt	36
Tabelle 17:	Anteil der gesamten Recyclinginputmasse die jeden Behandlungs- und Transportprozess durchläuft, pro Gerätekategorie und Szenario.....	58
Tabelle 18:	Anteil der gesamten Recycling-Input-Masse, die verwertet werden kann, pro Material/Element für jede Gerätekategorie und jedes Szenario.....	59

Abbildungen

Abbildung 1:	Illustrierung der Nomenklatur zur Kategorisierung der EEG im Rahmen des Projekts EVA II. Wie für die in dieser Abbildung dargestellte Gerätekategorie "Steuergeräte" enthält auch die Gerätekategorie "Aktuatoren" mehrere Gerätetypen. Die Gerätekategorie "Scheinwerfer" enthält jedoch nur den Gerätetyp "Scheinwerfer (vorne und hinten)", was in der Abbildung durch identische Bilder in beiden Spalten dargestellt ist. Auf der rechten Seite wird am Beispiel der Scheinwerfer dargestellt, dass ein bestimmter Gerätetyp mehrfach in einem Fahrzeug vorkommen kann.....	3
Abbildung 2:	Konzeptuelle Architektur des Gesamtmodells (EVA II).....	7
Abbildung 3:	Übersicht über das modellierte schweizerische Altfahrzeugverwertungssystem.....	9
Abbildung 4:	Umfang des Ökobilanzmoduls entlang des EEG Lebenszyklus.....	17
Abbildung 5:	Prozesse des dmFA sowie Materialverwertungsmoduls relevant für das Ökobilanzmodul.....	18
Abbildung 6:	Vergleich von Umweltnutzen (helle Balken) und -belastung (dunkle Balken) pro kg nach Szenario und Gerätekategorie für GWP & UBP.....	28
Abbildung 7:	Umweltnutzen pro kg Gerätekategorie durch Szenario "EEG Ausbau" im Vergleich zum Szenario "Baseline"	30
Abbildung 8:	Links: Umweltbelastung durch die Behandlungsprozesse pro kg Gerätekategorie für jedes Szenario. Rechts: Netto Veränderung der Umweltbelastung durch die Umstellung von Szenario Baseline auf das Szenario EEG Ausbau.....	30
Abbildung 9:	Links: Vermiedene Emissionen durch Substitution von Primärmaterialien pro kg Gerätekategorie für jedes Szenario. Rechts: Netto Gewinn an Umweltnutzen durch Umstellung vom Szenario Baseline auf das Szenario EEG Ausbau.....	31
Abbildung 10:	Vergleich von Umweltnutzen (helle Balken) und -einfluss (dunkle Balken) für GWP & UBP pro Fahrzeug	33
Abbildung 11:	Umweltnutzen durch Szenario "EEG Ausbau" im Vergleich zum Szenario "Baseline" für Gesamtmasse EEG pro Fahrzeug jeder Gerätekategorie.....	34
Abbildung 12:	Umweltnutzen durch Szenario "EEG Ausbau" im Vergleich zum Szenario "Baseline" für Gesamtmasse EEG pro Fahrzeug für jeden Gerätetyp am Beispiel UBP (die UBP Achse für ist für bessere Sichtbarkeit gestaucht)	35

Abkürzungsverzeichnis

AGVS	Autogewerbeverband Schweiz
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BEV	Battery Electric Vehicle (engl.); Fahrzeug mit reinem Elektroantrieb
dMFA	dynamic Material Flow Analysis (engl.); dynamisches Massenflussmodell
EAG	Elektronik Altgeräte
EEG	Eingebettete Elektronikgeräte in Fahrzeugen
EF3.0	Environmental Footprint Methode (Version 3.0)
EVA	Elektronik Verwertung Altautos
Fhz	Fahrzeug
GWP	Global Warming Potential (engl.); Treibhauspotenzial
HEV	Hybrid Electric Vehicle (engl.); Fahrzeug mit Hybridantrieb
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle (engl.); Fahrzeug mit Verbrennungsantrieb
JRC	"Joint Research Center" der Europäische Kommission
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (engl.); Fahrzeug mit Plug-in Hybridantrieb
PM	Permanentmagnet
PKW	Personenkraftwagen
RESH	Reststoffe Schredder/Schredderleichtfraktion
STM	Seltene Technologiemetalle
SARS	Stiftung Auto Recycling Schweiz
Swico	Wirtschaftsverband der Information Communication Technology und Online Branche
UBP	Umweltbelastungspunkte
VREG	Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte vom 20. Oktober 2021 (Stand am 1. Januar 2022) – SR 814.620
VRB	Vorgezogener Recyclingbeitrag
VEG	Vorgezogene Entsorgungsgebühr
xEV	Fahrzeuge mit Elektroantrieb (BEV, PHEV oder HEV)

Begriffsverzeichnis

Aktuatoren	Geräte, die Bewegungsfunktionen im Fahrzeug ausführen.
Altfahrzeug	Ein Fahrzeug, welches ans Ende der Lebensdauer angekommen ist.
Ausbaugerät	Ein EEG, welches aufgrund der VREG zwingend aus den Fahrzeugen ausgebaut und separat rezykliert werden muss.
Baseline	Name des Szenarios, das das bestehende Altfahrzeugrecyclingsystem in der Schweiz darstellt (im Referenzjahr 2021)
Bestandteile	Elektrische und elektronische Teile von Geräten, die für den Betrieb der Geräte unabdingbar sind.
Deep Dismantling	"Tiefenzerlegung" auf Englisch. Dieser Ausdruck beschreibt ein Experiment des Projekts EVA II wo EEG in ihre Bestandteile ausführlich zerlegt wurden.
EEG Ausbau	Name des Szenarios, in dem die EGG aus den Fahrzeugen ausgebaut werden und gemäss den Anforderungen an die Entsorgung der VREG stofflich verwertet werden.
Eingebettete Elektronikgeräte	Elektronikgeräte, welche im Fahrzeug eingebettet sind. Sie über Steuerungs- (Steuergeräte), Mess- (Sensoren), Bewegungsfunktionen (Aktuatoren) oder noch andere Funktionen (Beleuchtung, Energie- und Informationsübertragung) aus.
Finanzierungssystem	Ein System, das die Finanzierung der Entsorgung eines Produkts organisiert und sicherstellt. Es kann auf freiwilliger Basis zum Beispiel im Rahmen einer Branchenlösung eingeführt oder vom Bund vorgeschrieben werden. Im Fall von einem freiwilligen Finanzierungssystem, schliessen sich die Hersteller und Rücknahmepflichtigen an, um die Finanzierung von den von ihnen in Verkehr gebrachten Produkten sicherzustellen. In den meisten Fällen führt die Organisation einen Fonds und erhebt einen vorgezogenen Recyclingbeitrag beim Verkauf des Produkts. Der Fonds wird für die Finanzierung der Entsorgung verwendet.
Fraktion	Output einer Behandlung von EAG und EEG entsteht.
Funktionelle Einheit	Bezugs-/Vergleichsgrösse im Untersuchungsrahmen für Analysemethoden wie die Ökobilanz.

Gerätetyp	Geräte, welche dieselbe Funktion, ähnliches Design sowie einen ähnlichen Aufbau und eine ähnliche Zusammensetzung besitzen. Die Konzepte "Gerätekategorie" und "Gerätetyp" sind im Kapitel 1.2 genau definiert.
Gerätekategorie	Eine Kategorie bestehend aus verschiedenen Gerätetypen, welche eine ähnliche Zusammensetzung und Verhalten in der mechanischen Behandlung zeigen. Die Konzepte "Gerätekategorie" und "Gerätetyp" sind im Kapitel 1.2 genau definiert.
Ökobilanz	Eine systematische Analyse der potenziellen Umweltwirkungen von Produkten/Prozessen während des gesamten Lebenszyklus.
Reststoffe Schredder	Diejenige Fraktion, welche im Luftstrom eines Schredders entsteht und einen hohen Kunststoffanteil und den Grossteil der STM, die in EEG vorkommen, enthält. Wird als RESH abgekürzt.
Seltene Technologiemetalle / Seltene technische Metalle	Metalle wie zum Beispiel Gold, Neodym oder Kobalt, die aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften wie Leitfähigkeit oder Magnetismus unverzichtbar für komplexe Technologieprodukte und relativ selten in der Erdkruste sind (<0.01% der Masse).
Sensoren	Geräte, welche Messfunktionen im Fahrzeug ausführen.
Steuergeräte	Geräte, welche Steuerungsfunktionen im Fahrzeug ausführen.
Trockenlegung	Die Entfernung gefährlicher Bestandteile wie Batterien und Flüssigkeiten bei Altfahrzeugen vor der Weiterbehandlung im Grossschredder.

Zusammenfassung

Moderne Personenwagen enthalten eine beträchtliche Menge an eingebetteten elektronischen Geräten (EEG). Im Durchschnitt wird das Gesamtgewicht aller EEG pro Fahrzeug auf 30 bis 50 kg geschätzt. In den letzten Jahren hat die Anzahl dieser Geräte stark zugenommen. Ähnlich wie Heimelektronikgeräte (Computer, Telefon, Drucker, Bildschirme usw.) bestehen sie grösstenteils aus Industriemetallen (Eisen, Aluminium und Kupfer) und Kunststoffen, enthalten aber auch viele Seltene Technologiemetalle (STM) wie Edelmetalle (wie Gold, Silber, oder Platinum zum Beispiel), Indium, Lithium, Germanium, Neodym oder Tantal. In Anbetracht des Schweizer Fahrzeugbestands von 4.7 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2020 sowie der Verschrottung in der Schweiz von über 60'000 Altfahrzeugen pro Jahr, wird das signifikante Rückgewinnungspotenzial der STM aus Fahrzeugen deutlich. Ein Grossteil der EEG wird heute nicht entfernt und separat rezykliert, wenn ein Fahrzeug am Ende seines Lebenszyklus angelangt ist. Im aktuellen System werden die im Fahrzeug noch vorhandenen EEG gemeinsam mit dem Rest des Fahrzeugs in einem Grossschredder behandelt. Die in EEG enthaltenen STM konzentrieren sich nach der Behandlung in der Schredderleichtfraktion (RESH) auf, welche gemeinsam mit den Siedlungsabfällen verbrannt wird. Dabei geht der grösste Teil der enthaltenen STM verloren.

Mit dem im Rahmen des Projekts EVA II entwickelte Ökobilanzmodul wird das Umweltnutzen eines Szenarios "EEG Ausbau" analysiert, welches den Ausbau der EEG aus Fahrzeugen mit einer separaten Behandlung im System des Elektronikschrottrecyclings vorsieht, im Vergleich mit der heutigen Situation, in der die meisten EEG während der Verwertung in den Fahrzeugen verbleiben, (Szenario "Baseline"). Es dient somit dazu, den Umweltnutzen des Ausbaus für jeden Gerätetyp zu bestimmen und diesen untereinander zu vergleichen. Dies unterstützt die Entscheidung, ob ein bestimmter Gerätetyp in eine "Ausbaugeräteliste" aufgenommen werden soll. In der Ökobilanz werden die Umweltbewertungsmethoden Global Warming Potential (GWP), Umweltbelastungspunkte (UBP) sowie Environmental Footprint (EF3.0) verwendet.

Die Ergebnisse des Ökobilanzmoduls zeigen, dass für fast alle Gerätetypen der Ausbau und das separate Recycling ökologisch sinnvoll ist. Der mit dem Recycling erzielte Umweltnutzen durch die Rückgewinnung von Rohstoffen ist deutlich höher, als die mit den Recyclingprozessen verursachte Umweltbelastungen. Für die Gerätetekategorie Steuergeräte sowie Scheinwerfer ist eine deutliche Erhöhung des Umweltnutzens durch die verbesserte Rückgewinnung der enthaltenen Edelmetalle wie Gold, Silber und Palladium erreicht werden. Bei der Gerätetekategorie Scheinwerfer ergibt die Rückgewinnung von hochwertigen Kunststoffen einen hohen Umweltnutzen. Für die Gerätetekategorie Aktuatoren kann eine kleinere Erhöhung des Umweltnutzens beobachtet werden, da bereits in dem Szenario "Baseline" die Basismetalle Eisen, Aluminium und ein Teil des Kupfers zurückgewonnen werden, aus welchen Materialien die Geräte dieser Kategorie hauptsächlich bestehen. Für die Gerätetekategorie Kabel wird kein Umweltnutzen erreicht. Für die in EEG zusätzlich enthaltenen STM wie Neodym, Dysprosium sowie Praseodym existieren noch keine Rückgewinnungstechnologien, dieser mögliche Umweltnutzen verbleibt heute als ungenutztes Potenzial.

1 Einleitung

Moderne Personenwagen enthalten eine beträchtliche Menge an eingebetteten elektronischen Geräten (EEG). Im Durchschnitt wird das Gesamtgewicht aller EEG pro Fahrzeug auf 30 bis 50 kg geschätzt [1]. In den letzten Jahren hat die Anzahl dieser Geräte stark zugenommen. Ähnlich wie Heimelektronikgeräte (Computer, Telefon, Drucker, Bildschirme usw.) bestehen diese grössten-teils aus Industriemetallen (Eisen, Aluminium und Kupfer). Sie enthalten aber auch viele Seltene Technologiemetalle (STM) wie Edelmetalle (wie Gold, Silber, oder Platinum zum Beispiel) Indium, Lithium, Germanium, Neodym oder Tantal [1]. In Anbetracht des Schweizer Fahrzeugbestands von 4.7 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2020 sowie der Verschrottung von über 60'000 Altfahrzeu-gen pro Jahr, wird das signifikante Rückgewinnungspotenzial der STM aus Fahrzeugen deutlich.

Ein Grossteil der EEG wird heute nicht entfernt und separat rezykliert, wenn ein Fahrzeug am Ende seines Lebenszyklus angelangt ist. Im aktuellen System werden die im Fahrzeug noch vor-handenen EEG gemeinsam mit dem Rest des Fahrzeugs in einem Grossschredder behandelt. Die in EEG enthaltenen seltenen Technologiemetalle konzentrieren sich nach dieser mechanischen Behandlung in der Schredderleichtfraktion (RESH) auf, welche gemeinsam mit den Siedlungsab-fällen verbrannt wird. Dabei geht der grösste Teil der enthaltenen STM verloren¹.

In den Jahren 2016 bis 2021 wurde die Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) revidiert und auf den 1. Januar 2022 in Kraft gesetzt. Sie sieht vor, dass die in Fahrzeugen enthaltenen EEG gemäss den Anforderungen an die Entsorgungen (Artikel 10) separat rezykliert werden müssen, sofern deren Ausbau mit ver-hältnismässigem Aufwand möglich und deren stoffliche Verwertung nach dem Stand der Technik sinnvoll ist. Das UVEK wird den Geltungsbereich in einer departmentalen Verordnung regeln. Für Geräte und Bestandteile aus Fahrzeugen, die unter die VREG fallen, unterstehen die Hersteller einer kostenlosen Rücknahme- und Entsorgungspflicht (Artikel 6 und 9):

Art. 1 Zweck

(...)

*² Die zu entsorgenden Geräte und Bestandteile sollen getrennt von den übrigen Abfällen gesammelt und die in den Geräten und Bestandteile enthaltenen verwertbaren Stoffe zurückgewonnen werden, soweit dies **technisch möglich, wirtschaftlich tragbar und ökologisch sinnvoll** ist*

Art. 2 Gegenstand und Geltungsbereich

(...)

*² Für fest installierte Geräte und Bestandteile in Bauten, **Fahrzeugen** oder sonstigen Gegenständen gilt die Verordnung, wenn deren Ausbau mit **verhältnismässigem Aufwand** möglich und deren stoff-lische Verwertung nach dem Stand der Technik sinnvoll ist.*

(...)

¹ In bestimmten Anlagen wie in der KEZO in Hinwil wird die Schlacke aus der Verbrennung aufbereitet. Ein Anteil der darin enthaltenen Metallen kann so zurückgewonnen werden. Die Rückgewinnungsrate für Metalle im RESH ist unbekannt (siehe auch: <https://www.zar-ch.ch>). In der Praxis herrscht jedoch ein Konsens darüber, dass eine getrennte Sammlung und Recycling von Elektroschrott bei weitem die besten Ergeb-nisse in Bezug auf die stoffliche Verwertung von Metallen erbringt [2].

⁴ Das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) bestimmt die Geräte und Bestandteile nach den Absätzen 1–3.

(...)

Art. 9 Entsorgungspflicht

¹ Die Rücknahmepflichtigen müssen die Geräte und Bestandteile entsorgen, die sie nicht weiterverwenden und nicht an andere Rücknahmepflichtige übergeben. Sie können Dritte damit beauftragen.

Art. 10 Anforderungen an die Entsorgung

¹ Wer Geräte und Bestandteile entsorgt, muss sicherstellen, dass die Entsorgung umweltverträglich und nach dem Stand der Technik erfolgt; insbesondere müssen:

(...)

- c) stofflich verwertbare Bestandteile wie Eisen, **Basis- und Edelmetalle sowie Kunststoffe und Gläser** entsprechend verwertet werden;
- d) **seltene Technologiemetalle** wie Indium, Gallium, Germanium, Neodym und Tantal, zurückgewonnen werden, wenn es dafür entsprechende Verfahren oder Anlagen gibt;
- e) nicht stofflich verwertbare Bestandteile wie schadstoffbelastete Kunststoffe und Gläser thermisch verwertet oder thermisch beseitigt oder andernfalls abgelagert werden.

1.1 Eingebettete elektronische Geräte und ihre Klassifizierung

EEG umfassen alle Geräte im Fahrzeug, welche mit elektrischem Strom funktionieren und entweder mit der zentralen Energieversorgung verbunden oder mit einer eigenen Versorgung durch Batterien (wie z.B. für Reifendrucksensoren) ausgestattet sind.

In diesem Projekt wurden EEG in verschiedene Gerätetypen zusammengefasst. EEG, die eine ähnliche Funktion erfüllen, ähnliche Bestandteile enthalten und eine ähnliche Zusammensetzung haben, werden einem bestimmten Gerätetyp zugeordnet. Diese Gerätetypen sind die Grundlage, auf der die Analysen und Vergleiche durchgeführt werden, um kohärente und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Die Zuordnung zu einem bestimmten Gerätetyp wurde von Fall zu Fall geprüft. Dies ist aus mehreren Gründen erforderlich: Identische EEG können je nach Hersteller unterschiedliche Bezeichnungen haben. Zusätzlich werden vermehrt Funktionen, die früher von mehreren EEG bereitgestellt wurden, in ein einziges Gerät integriert. Der Grad der Integration hängt von der Fahrzeugklasse, der Marke und vor allem vom Baujahr ab. In der Vergangenheit waren beispielsweise das Autoradio und das GPS zwei getrennte Geräte. Heute gibt es jedoch in der Regel ein grosses Multimedia-Modul, welches die Funktionen des Autoradios und des GPS vereint. Trotz ihrer funktionalen Unterschiede wurden die Geräte Autoradio, GPS-Navigator und Multimedia-Einheit dem gleichen Gerätetyp "Steuergerät Infotainment (Sound-, Navi-, und Multimedia)" zugeordnet.

Gerät	Gerätetyp	Gerätekategorie	Durchschnittsmasse/-anzahl pro Fahrzeug
			
Pioneer MVH-I30DAB – Autoradio			
			
7021A-16G 7 inch 2 DIN Android Car MP5 Player Stereo Car Radio Car Multimedia Player Support GPS Navigation	"Steuergerät Infotainment (Sound-, Navi-, und Multimedia)"	"Steuergerät"	
			
Hauptscheinwerfer ABAKUS 212-11K2L-LD-EM			
			
Heckleuchte ABAKUS 215-19K6-LD-UE	"Scheinwerfer (vorne und hinten)"	"Scheinwerfer"	
			
			4 x "Scheinwerfer (vorne und hinten)" 4 x 2223 g = 8892 g pro Fhz

Abbildung 1: Illustrierung der Nomenklatur zur Kategorisierung der EEG im Rahmen des Projekts EVA II. Wie für die in dieser Abbildung dargestellte Gerätekategorie "Steuergeräte" enthält auch die Gerätekategorie "Aktuatoren" mehrere Gerätetypen. Die Gerätekategorie "Scheinwerfer" enthält jedoch nur den Gerätetyp "Scheinwerfer (vorne und hinten)", was in der Abbildung durch identische Bilder in beiden Spalten dargestellt ist. Auf der rechten Seite wird am Beispiel der Scheinwerfer dargestellt, dass ein bestimmter Gerätetyp mehrfach in einem Fahrzeug vorkommen kann.

Gerätetypen ihrerseits können in verschiedene Gerätekategorien eingeteilt werden (siehe Tabelle 1):

- Die Kategorie "**Steuergerät**" (auch Controller genannt) umfasst alle Geräte, die Steuerungsaufgaben im Fahrzeug übernehmen, wie beispielsweise die Steuerung der Klimaanomatik.
- Die Kategorie "**Aktuator**" umfasst Geräte, welche mit Hilfe von Bestandteilen wie kleinen Elektromotoren, Magnetventilen und dergleichen Bewegungsfunktionen übernehmen, wie zum Beispiel der Fensterhebemotor.
- Die Kategorie "**Sensor**" wird in EVA II nicht berücksichtigt, da solche Geräte meist sehr klein sind und keine relevanten Mengen an Metallen enthalten [2].

Zusätzlich gibt es noch einzelne Gerätetypen, die nicht diesen Kategorien zugeordnet werden können, da sie im Vergleich dazu eine andere stoffliche Zusammensetzung haben und bei der Behandlung in einer Recyclinganlage unterschiedliche Outputfraktionen produzieren. Dazu zählen folgende Kategorien:

- Die Kategorie "**Schweinwerfer**", die nur den Gerätetyp "Front- und Rückscheinwerfer" enthält

- Die Kategorie "Kabel", die nur die Gerätetypen "Kabelbaum" und "Ladekabel" enthält, umfasst Geräte welcher die anderen EEG miteinander verbindet, um Strom und Informationen zu übertragen.

Tabelle 1: Gerätekategorien und ihrer typischen Bestandteile und Zusammensetzungen

Gerätetyp	Im Projekt berücksichtigt	Typische Bestandteile	Kommentar
Aktuatoren	JA	Elektromotoren, Permanentmagnete	Permanentmagnete können Seltenerdmetalle (STM wie Nd, Dy...) enthalten. Sonst ist diese Kategorie Kupfer- und Eisenreich.
Steuergeräte	JA	Leiterplatten	Diese Kategorie enthält deutlich mehr Edelmetalle (STM wie Au, Ag, Pd, ...) als die andere.
Kabel	JA	Kupferkabel, Stecker	Enthält insbesondere Kupfer und Kunststoffe
Scheinwerfer	JA	Elektromotoren, Leiterplatten, durchsichtigen Kunststoff (PMMA)	Besteht nur aus den Gerätetyp "Scheinwerfer (vorne und hinten)". Enthält wertvolle Kunststoffe (wie PMMA) und Edelmetalle. Kann in bestimmten Fällen kleine Mengen vom Schadstoff Quecksilber enthalten
Sensoren	NEIN		Zu klein, um stofflich relevant zu sein. Diese Kategorie wurde in EVA nicht berücksichtigt.

Gerätetypen bestehen aus einer Anzahl an immer gleichen Bestandteilen. Beispielsweise enthalten EEG der Kategorie "Aktuator" immer den Bestandteil "Elektromotor" und "Magnete". Leiterplatten sind ebenfalls ein meist vorkommender Bestandteil der EEG Kategorie "Steuergerät".

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der berücksichtigt werden muss, ist die Variation der durchschnittlichen Masse eines Gerätetyps pro durchschnittlichem Fahrzeug. Ein durchschnittliches Fahrzeug (für das Referenzjahr 2021) enthält beispielsweise 4 "Front- und Rückscheinwerfer", die im Durchschnitt jeweils 2.2 kg wiegen, was eine Gesamtmasse von 8.9 kg für diesen Gerätetyp ergibt. Ein durchschnittliches Fahrzeug enthält aber nur 0,98 "Steuergeräte Infotainment (Sound-, Navi-, und Multimedia)", die jeweils 1'610 g wiegen², was einer Gesamtmasse von 1'578 g dieses Gerätetyps pro durchschnittlichem Fahrzeug im Referenzjahr 2021 entspricht (siehe Abbildung 1).

Die Listen aller im Projekt identifizierten und als relevant erachteten Gerätetypen und ihre Bestandteile befinden sich im Anhang (ANHANG A und ANHANG B).

² Das bedeutet, dass von 100 Fahrzeugen 98 eines enthalten und 2 nicht

1.2 Seltene Technologiemetalle

Den seltenen Technologiemetallen (STM) werden Edel-, Seltenerd-, sowie weitere spezielle Metalle zugeordnet, die in der Erdkruste in niedrigen Gehalten vorhanden sind [1], [3]. STM besitzen spezielle physikalische Eigenschaften, welche in verschiedenen Technologien, vor allem in der Elektronik, essentiell sind. Das macht sie in vielen Fällen unersetztlich und sie sind oft von hoher strategischem Bedeutung. Die heutigen Rückgewinnungsquoten sind allerdings für viele der STM aufgrund technologischer und ökonomischer Hürden sehr tief [4]. Die VREG sieht in den Anforderungen an die Entsorgung ihre Rückgewinnung unter bestimmten Bedingungen vor.

Bei den Seltenerdmetallen wie Neodym oder Dysprosium ist der Recyclinganteil geringer als 1 Prozent. Dies, obwohl die Versorgungssicherheit dieser Metalle aus Primärproduktion in Zukunft nicht gegeben ist und diese Metalle deshalb nebst vielen Weiteren von der Europäischen Union als kritische Rohstoffe (Critical Raw Materials) eingestuft werden [2], [4], [5]. Neodym und Dysprosium werden in leistungsfähigen Permanentmagneten verwendet, welche für Schlüsseltechnologien der Energiewende wie E-Mobilität, Windenergie sowie weiteren wachstumsstarken Anwendungen benötigt werden. Die Primärproduktion der STM ist oft stark umweltbelastend, da aufgrund ihrer niedriger Gehalte in den Minen unter hohem Energieaufwand und der Verwendung hoher Mengen an Chemikalien grosse Mengen an Gestein abgebaut werden müssen. Die Rückgewinnung von STM ist daher von beträchtlicher wirtschaftlicher, strategischer sowie ökologischer Bedeutung [6]. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht an typischen STM, welche in Fahrzeugen zu finden sind.

Tabelle 2: Auswahl relevanter STM in Fahrzeugen sowie deren typischen Anwendungen

STM Kategorie	STM	Typische Anwendungen [7]
Edelmetalle	Gold (Au)	Elektronik, Leiterplatten, Stecker
	Silber (Ag)	Elektronik, Leiterplatten, Stecker
	Palladium (Pd)	Elektronik, Katalysatoren
	Platin (Pt)	Elektronik, Katalysatoren
	Ruthenium (Ru)	Elektronik, Katalysatoren
	Rhodium (Rh)	Elektronik, Katalysatoren
Seltene Erden	Lanthan (La)	Metallegierungen, Elektronik
	Neodym (Nd)	Permanentmagnete
	Dysprosium (Dy)	Permanentmagnete
	Praseodym (Pr)	Permanentmagnete
	Samarium (Sm)	Permanentmagnete
Weitere Übergangsmetalle	Kobalt (Co)	Magnete, Katalysatoren, Batterien
	Tantal (Ta)	Kondensatoren, Legierungen, Elektronik
Leichtmetalle	Lithium (Li)	Batterien

1.3 Ziel des Projekts EVA II

Aufbauend auf den Resultaten des Projekts EVA I wurde 2019 als Fortsetzung das Projekt EVA II gestartet. Das Hauptziel des Projekts EVA II bestand darin, ein dauerhaftes System zur Überwachung (ein Monitoringsystem) des Lebenszyklus von EEG in Fahrzeugen zu entwickeln. Das Monitoringsystem soll bei der Bestimmung des Artikels 2 Absatz 2 der VREG als Unterstützung dienen, um die Frage zu beantworten, für welche Geräte und Bestandteile in Fahrzeugen der Ausbau verhältnismässig und die stoffliche Verwertung nach dem Stand der Technik sinnvoll sind. Dieses Monitoringsystem muss dafür folgende Aufgaben erfüllen können:

- A. Abschätzung der Kosten und des Umweltnutzens des Ausbaus und separaten Recyclings für jeden identifizierten Gerätetyp. Dies dient der Unterstützung des BAFU für die Festlegung des Geltungsbereichs der VREG in der Departementalen Verordnung. Diese wird eine Liste der Gerätetypen enthalten, die separat ausgebaut werden und gemäss den Anforderungen der VREG entsorgt werden müssen (sogenannte Ausbaugeräteliste). (**siehe Kapitel 2**)
- B. Simulation von Zukunftsszenarien der EEG- und STM-Massenflüsse im Altfahrzeug-Recyclingsystem durch die Entwicklung der Schweizer Fahrzeugflotte als Entscheidungshilfe für die Akteure im System. (**siehe Kapitel 3**)
- C. Bestimmung der aktuellen Leistung des Schweizer Altfahrzeug-Recyclingsystems in Bezug auf Verluste und Rückgewinnung von STM und anderer Wertstoffe in EEG. (**siehe Kapitel 4**)

1.4 Das Gesamtmodell

Die im Kapitel 1.3 beschriebenen Aufgaben werden mit Hilfe der Modellierung des gesamten Schweizer Altfahrzeug-Recyclingsystems (das sogenannte "Gesamtmodell") erfüllt. Dieses Gesamtmodell lässt sich in vier Module aufteilen (siehe Abbildung 2):

1. Ein **dynamisches Massenflussmodell (dMFA-Modul)** wird verwendet, um die Anzahl, die Antriebstechnologie sowie die Masse von Fahrzeugen, die identifizierte Gerätetypen und die darin enthaltenen Bestandteile und Elemente während dem Lebenszyklus der EEG in der Schweiz zu bestimmen [8].
2. Ein **Materialverwertungsmodul** ermöglicht die Simulation verschiedener Verwertungswege und berechnet die zurückgewonnene Masse ausgewählter Metalle und Kunststoffe aus allen in der Studie identifizierten Gerätetypen, wenn sie in einer E-Schrott Recyclinganlage behandelt würden [9].
3. Ein **Ökobilanzmodul** wird zur Berechnung der Umweltauswirkungen des Ausbaus und getrennten Recyclings von Gerätetypen im Vergleich zu ihrer Behandlung in einem Grossschredder in Fahrzeuge verwendet. Es dient dazu, den Umweltnutzen der Aufnahme eines bestimmten Gerätetyps in die Ausbaugeräteliste zu berechnen [10].

4. Ein **Wirtschaftsmodul** wird verwendet, um die Kosten des Ausbaus und getrennten Recyclings von bestimmten Gerätetypen zu schätzen. Es dient dazu, die Kosten der Aufnahme eines bestimmten Gerätetyps in die Ausbaugeräteliste zu berechnen [11].

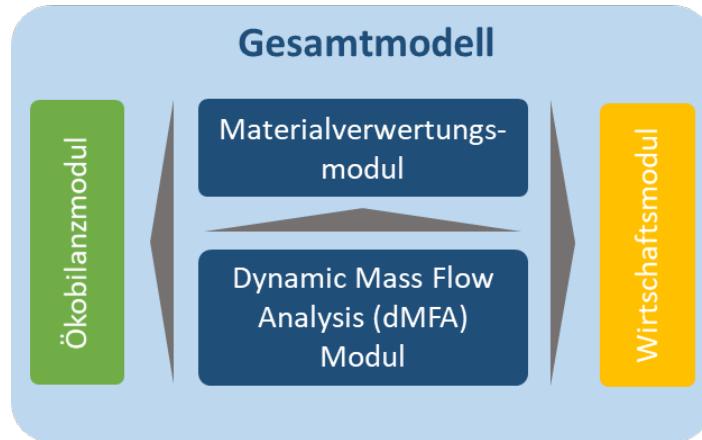


Abbildung 2: Konzeptuelle Architektur des Gesamtmodells (EVA II)

Im Gesamtmodell wird das schweizerische Altfahrzeugverwertungssystem abgebildet. Die Architektur des Systems mit nummerierten Prozessen und Datenebenen der Stoffflüsse ist in Abbildung 4 dargestellt. Eingangsgröße in das Modell ist der Fahrzeugbestand (Prozess 1). Infolge von Reparaturen können während der Fahrzeulebensdauer EEG ausgetauscht werden (Prozess 4). Ersetzte EEG werden entweder zurück an den Hersteller geschickt, um wiederaufbereitet zu werden oder in E-Schrott Recyclinganlagen behandelt (Prozess 17). Aufgrund von Unfällen oder wegen des Alters verlässt ein Teil der Fahrzeuge den Bestand (Prozesse 2 und 3 gemeinsam als "Abfluss" bezeichnet) und gelangt in die Fahrzeugzerlegung von Altfahrzeugen (Prozess 5). Ein Teil dieses Abflusses wird exportiert, wozu auch der so genannte "unbekannte Verbleib" gezählt wird, während der Rest in der Schweiz verwertet wird. Bei der Verwertung werden einige EEG aus den Altfahrzeugen entfernt und einzelne davon weiterverkauft, um bei der Fahrzeugreparatur als Ersatzteile wiederverwendet zu werden. Parallel findet bei diesem Prozess die Trockenlegung der Fahrzeuge statt. Die EEG, die zukünftig als Gerätetypen der Ausbaugeräteliste definiert werden (siehe 1.1), werden ausgebaut, bevor das Altfahrzeug in den Schredder gelangt (Prozess 10). Alle EEG, die nicht vorher ausgebaut wurden, werden zusammen mit den Fahrzeugen geschreddert. Die in geschredderten EEG enthaltenen Materialien werden dabei auf die Ausgangsfaktionen des Schredders verteilt, welche in die folgenden finalen Fraktionen zusammengefasst werden können: Die Schredderleichtfraktion (RESH) und die Metallfraktionen (diese Fraktionen enthalten meist einen Restanteil von Kunststoffen). Der RESH wird thermisch verwertet, in bestimmten Fällen werden nach der Verbrennung aus der Schlacke Metalle zurückgewonnen (Prozess 13 bzw. 14). Die Metallfraktionen aus dem Schredder gelangen in verschiedene Metallrecyclingprozesse (Prozess 15), wo ein Teil der Materialien zurückgewonnen wird. Ausgebaute Geräte gelangen in das EEG Recycling, welches durch das Materialverwertungsmodul modelliert wird (Prozess 17).

Das System ist in verschiedene Modellebenen unterteilt, dargestellt durch die Farbe der Verbindungspfeile in der Abbildung 3. Blau gekennzeichnet sind alle Stoffflüsse, bei denen ganze Fahrzeuge und die darin enthaltenen EEG und darin enthaltene Elemente von einem Prozess in den

Nächsten gelangen. In orange werden Stoffflüsse gekennzeichnet, bei denen nur EEG, ihre Bestandteile und die darin enthaltene Elemente (siehe ANHANG A und ANHANG B für vollständige Liste der Bestandteile und Gerätetypen) transferiert werden. In Gelb werden Stoffflüsse gekennzeichnet, bei denen nur Fraktionen und Elemente transferiert werden.

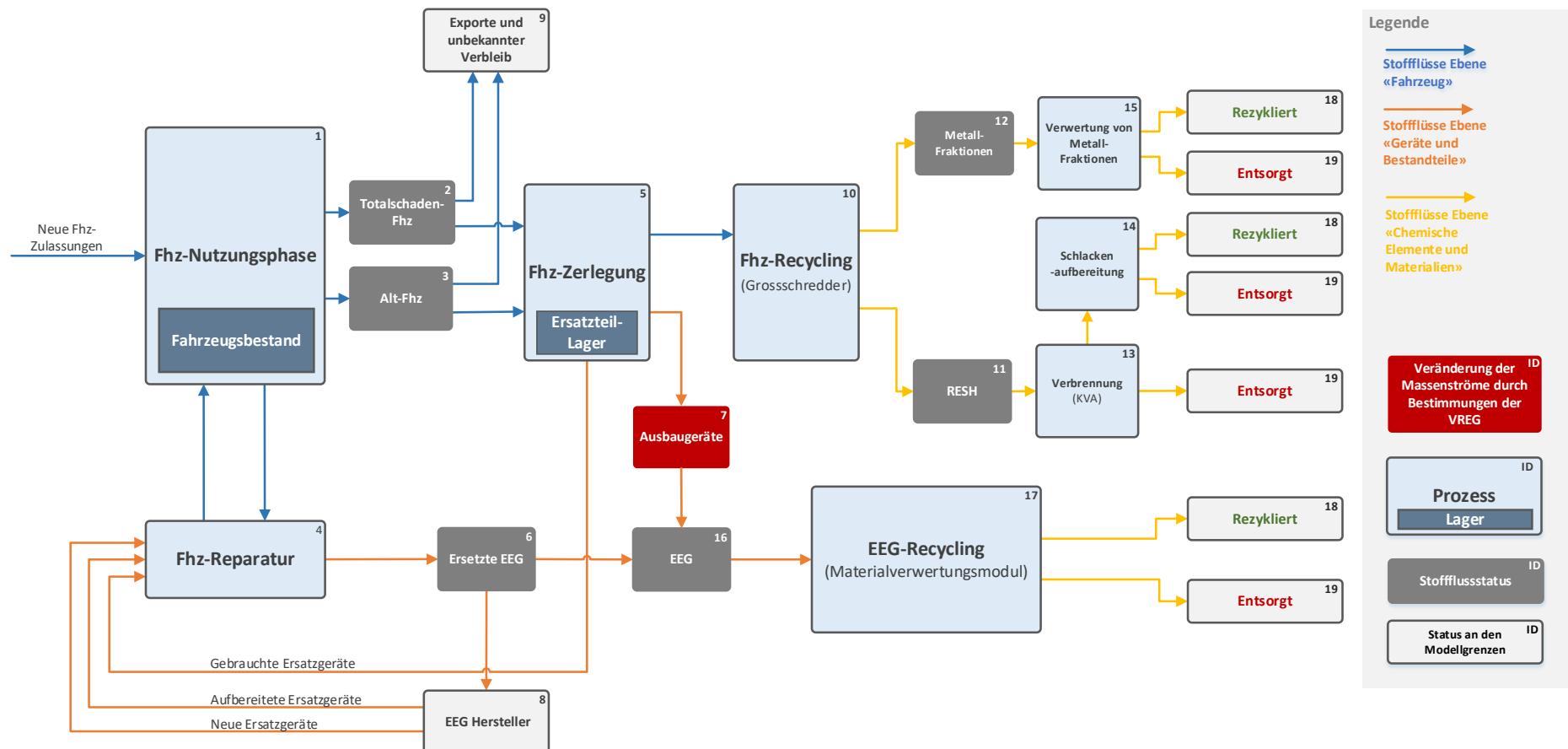


Abbildung 3: Übersicht über das modellierte schweizerische Altfahrzeugverwertungssystem

1.5 Ziel des Ökobilanzmoduls

Im heutigen System verbleiben alle Geräte, die nicht als gebrauchte Ersatzteile für den Verkauf ausgebaut werden, im Fahrzeug und werden mit diesem geschreddert. Ein Teil der enthaltenen STM, besonders die in Leiterplatten verwendeten Edelmetalle wie Gold, Silber und Palladium landen, wie in EVA I gezeigt, im RESH, welcher verbrannt wird [2]. Die in EEG enthaltenen Industriemetalle Eisen, Aluminium und ein Teil des Kupfers können über konventionelle Recyclingprozesse weitestgehend zurückgewonnen werden. Gemäss der VREG müssen bestimmte EEG, die zu einer "Ausbaugeräteliste" gehören, ausgebaut und separat rezykliert werden.

Der Ausbau und das Recycling von EEG umfasst die folgenden Kernelemente:

- Alle Gerätetypen die auf der Ausbaugeräteliste stehen, müssen vor der Behandlung im Grossschredder aus dem Altfahrzeug entfernt werden. Dies könnte zusammen mit der Trockenlegung des Altfahrzeugs durchgeführt werden.
- Die ausgebauten EEG werden gesammelt und zu auf Elektroschrottrecycling spezialisierte Unternehmen transportiert.
- Die EEG fliessen damit in den Massenstrom des Recyclings der Elektro- und Elektronikgeräte und werden gemeinsam mit diesen verwertet.

Ziel des Ökobilanzmoduls ist die Bestimmung des Umweltnutzens des Ausbaus und Recycling für jeden Gerätetyp. Dies wird anhand des Vergleichs der Umweltbelastungen des heutigen Systems (Szenario "Baseline") mit dem Ausbau und Recycling der EEG ermittelt.

Hierzu wurden zwei Szenarien definiert ("Baseline" und "EEG Ausbau", siehe Unterkapitel Szenarien), für die jeweils eine Ökobilanz durchgeführt wird. Mit der Ökobilanz werden für jeden Gerätetyp die Umweltbelastungen durch das Recycling mit dem potentiellen Umweltnutzen durch die Rückgewinnung der in den Geräten enthaltenen Materialien verglichen. Die Differenz zwischen Belastungen und Nutzen wird für beide Szenarien ermittelt und verglichen. Basierend auf dem Massenstrommodul der Schweizer Fahrzeugflotte (dMFA Modul) wie auch dem Materialverwertungsmodul werden im Ökobilanzmodul die Umweltauswirkungen der verschiedenen Gerätetypen für verschiedene Szenarien modelliert.

Die Analyse stützt sich auf die Resultate einer früheren Ökobilanzuntersuchung zur Verwertung von EEG in Fahrzeugen, welche im Rahmen des Projektes EVA I erstellt wurde [2]. Neu wurde an Stelle einer einzelnen Analyse ein Ökobilanzrechner entwickelt, der es erlaubt, Analysen für verschiedene Geräte durchzuführen. Dies ermöglicht die Veränderung von Parametern und einen späteren Ausbau, um zukünftige Entwicklungen abzubilden. Die Gewichtung von Umweltfaktoren in bestimmten Methoden zur Wirkungsabschätzung wie der Methode der ökologischen Knappheit (wegen der Masseinheit Umweltbelastungspunkte auch UBP-Methode genannt) hat sich seit der Veröffentlichung von EVA I verändert. Die vorliegende Studie verwendete die aktuelle Version der UBP Bewertungsmethode von 2021. Zudem besteht im Vergleich zur früheren Studie eine bessere Datengrundlage, welche aussagekräftigere Analysen ermöglicht. Die Ergebnisse des

Ökobilanzrechners ermöglichen den Netto-Umweltnutzen für die verschiedenen Gerätetypen zu vergleichen sowie das Gesamtpotenzial aller Geräte zu berechnen.

2 Methodik

2.1 Ansatz

In einer Ökobilanz wird die Wirkung eines Produkts auf die Umwelt von der Rohstoffgewinnung und Herstellung über die Nutzung bis hin zur Entsorgung analysiert. Dabei werden alle relevanten Prozessschritte, die Transportvorgänge, das Nutzungsverhalten wie auch die Behandlungsverfahren am Ende der Nutzungsdauer miteinbezogen. So kann eine gesamtheitliche Betrachtung aller Umwelteinflüsse erstellt werden. Eine Ökobilanz umfasst gemäss ISO 14'040/44 vier Schritte:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens ("Definition of goal and scope") (im Kapitel 2.1)
- Sachbilanz (Inventaranalyse aller relevanten Prozesse; "inventory analysis") (im Kapitel 2.3)
- Wirkungsabschätzung (Impact Assessment) (im Kapitel 3)
- Auswertung der Ergebnisse (Interpretation) (im Kapitel 3.1)

2.1.1 Untersuchungsrahmen

Der Untersuchungsrahmen dieser Studie umfasst ausschliesslich die Verwertung der EEG. Damit starten alle Betrachtungen am Ende der Nutzungsdauer der Produkte – d.h. der eingebetteten elektronischen Geräte (EEG) – und enden bei der Entsorgung.

Um die relativen Umweltvorteile des Recyclings zu bewerten, berücksichtigt die Ökobilanz die potentiell vermiedenen Umweltbelastungen von primären Produktionsprozessen auf Grund der erzeugten Recyclingprodukte. Diese Vorgehensweise wird als "avoided burden", auf Deutsch vermiedene Belastung, bezeichnet und erfordert die zusätzliche Modellierung der primären Produktionspfade, welche nötig wären, wenn die Sekundärmaterialien nicht auf dem Markt verfügbar gemacht würden. Der Unterschied zwischen den Umweltauswirkungen des Recyclings mit dieser Primärproduktion zeigt das Potential an möglichen Umweltvorteilen der Recyclingprozesse; Vorteile welche im Verhältnis zu den Auswirkungen des restlichen Systems dargestellt werden.

2.1.2 Methoden der Ökobilanzrechnung

Im Ökobilanzrechner des Moduls werden drei verschiedene Methoden zur Bewertung der Umweltbelastungen verwendet:

- Global Warming Potential (IPCC 2013 GWP 100a V1.03)

Die GWP Methode beschreibt das kumulierte Treibhausgaspotential über hundert Jahre aller Prozesse ausgedrückt in kg CO₂-äquivalent Emissionen pro funktionelle Einheit (z.B. 1 kg).

- Methode der ökologischen Knappheit (Ecological Scarcity 2021)

Die kumulierten Einflüsse aller Prozesse werden in Umweltbelastungspunkten (UBP) ausgedrückt. Die Methode mit den Ökofaktoren für die Schweiz vergleicht die aktuellen Schadstoffemissionen und Ressourcenverbräuche mit den Zielen der schweizerischen Umweltpolitik und hat sich daher in der Schweiz etabliert. Sie berücksichtigt eine grosse Palette von Umweltbelastungen wie Klimabelastung, Toxizität oder ökologischer Belastung und fasst diese in einen Wert mit der Einheit Umweltbelastungspunkte zusammen.

- **Environmental Footprint (EF3.0)**

Die EF Methode beschreibt die kumulierten Einflüsse aller Prozesse in EF3.0 Punkten. Es ist eine von der EU entwickelte und auf europäischer Ebene häufig verwendete Methode, um Umwelteinflüsse wie Klimabelastung, Toxizität oder Einflüsse auf ökologische Faktoren wie Eutrophierung oder Wasserverbrauch zu analysieren. Die verschiedenen Unterfaktoren werden mit unterschiedlicher Gewichtung in einer kumulierten Punktzahl zusammengefasst, ähnlich wie bei der Methode der ökologischen Knappheit.

In den umfassenderen Methoden Environmental Footprint und Methode der ökologischen Knappheit sind Treibhausgasemissionen ebenfalls berücksichtigt, daher weisen alle drei Methoden bei Prozessen bei denen Treibhausgasemissionen ein dominierender Faktor sind, eine hohe Korrelation auf (beispielsweise Prozesse, welche viel Energie benötigten, weisen bei allen drei Methoden hohen Umweltbelastungen in der entsprechenden Bewertung auf).

Die Untersuchung der Umweltbelastungen durch diese drei oft verwendeten Methoden ermöglicht eine gute Einschätzung und Vergleichbarkeit sowie die Einordnung der Ergebnisse im internationalen Kontext.

2.2 Struktur des Ökobilanzmoduls

2.2.1 Systemdefinition

Folgende Materialien sind im Ökobilanzmodul berücksichtigt:

Tabelle 3: Im Modul berücksichtigte Materialien [2]

Kategorie	Materialien
Industriemetalle / Basismetalle	Eisen (Fe) Aluminium (Al) Kupfer (Cu)
Edelmetalle	Gold (Au) Silber (Ag) Palladium (Pd)
Kunststoffe	Polypropylen (PP) Polymethyl methacrylate (PMMA) Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) Polycarbonat/Acrylnitril-Butadien-Styrol (PC/ABS)

Diese Materialien entsprechen grösstenteils den im heutigen System zurückgewonnenen Metallen und Kunststoffen aus Elektroschrott.

Für die in EEG zusätzlich enthaltenen STM wie Neodym, Dysprosium sowie Praseodym existieren noch keine industriellen Rückgewinnungsprozesse. Der mögliche Umweltnutzen ist ein heute noch ungenutztes Potenzial und es kann für diese Elemente noch keine Ökobilanz durchgeführt werden.

Für die Ökobilanz wird folgende funktionelle Einheit verwendet:

1 kg Eingebettetes Elektronisches Gerät (EEG)

Die Ökobilanz wird für die vier ausgewählten Gerätekategorien (1) Scheinwerfer, (2) Aktuator, (3) Steuergerät, sowie (4) Kabel durchgeführt. Jeder der in dieser Studie untersuchten Gerätetypen kann einer dieser vier Kategorien zugeordnet werden (siehe ANHANG A). Aus Sicht der Zusammensetzung und des Recyclings sind die zu einer bestimmten Kategorie gehörenden Geräte weitgehend ähnlich. Daher wurde die Ökobilanz für eine funktionelle Einheit jeder Gerätekategorie erstellt. Dies ergibt einen Umweltnutzen pro kg jeder behandelten Gerätekategorie. Für die Bestimmung des Umweltnutzens eines Gerätetyps, wird der Umweltnutzen pro kg innerhalb der entsprechenden Gerätekategorie mit der Durchschnittsmasse des Gerätetyps multipliziert.

2.2.2 Szenarien und Systemmodell

Für den Vergleich werden im Modul das heutige Altfahrzeugrecyclingsystem der Schweiz (Szenario "Baseline") und die unter Berücksichtigung der Bedingungen in der revidierten VREG angedachten Situation mit separatem EEG Recycling (Szenario "EEG Ausbau") analysiert. Die Übersicht über die beiden Szenarien zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4: Beschreibung der Szenarien

Szenario Name	Beschreibung
"Baseline"	Entspricht dem heutigen System
	Verbleib der EEG im Fahrzeug
	Behandlung des Altfahrzeugs im Grossschredder.
	Verbrennung des RESH in der Kehrrichtverbrennungsanlage
"EEG Ausbau"	Keine Zurückgewinnung von Rohstoffen aus Kehrrichtschlacke
	Ausbau der EEG aus dem Fahrzeug
	Behandlung der EEG in einer für Elektroschrott spezialisierten Anlage
	Rückgewinnungsprozesse der Materialfraktionen aus behandelten EEG wie im existierenden System für Elektronikschrott

Abbildung 4 zeigt alle im Modul berücksichtigten Prozesse, Materialflüsse der EEG sowie den Umfang des Ökobilanzmoduls innerhalb des EEG Lebenszyklus. Die beiden Szenarien sind mit Farben markiert und zeigen den Weg der STM.

Im heutigen System (Szenario "Baseline") werden die nicht entnommenen EEG gemeinsam mit dem gesamten Altfahrzeug im Grossshredder behandelt. Durch Handsortierung kann nach dem Schreddern in gewissen Fällen ein Teil der Leiterplatten separiert werden. Es liegen allerdings keine genauen Daten vor, wie gross der Anteil der separierten Menge gegenüber der enthaltenen Menge an Leiterplatten in den Geräten ist. Kunststoffe gelangen nach der Behandlung im

Grossshredder vollständig in den RESH. Für die Modellierung der Szenario "Baseline" werden die Fraktionen Leiterplatten sowie Kunststoffe vollständig der RESH-Fraktion zugeordnet. Die restlichen im Modul enthaltenen Behandlungsprozesse sind im heutigen System vorhanden und es werden für die Modellierung der Ökobilanz dieselben Prozesse der Szenario "Baseline" verwendet. Die Basismetalle der EEG werden im Szenario "Baseline" gemeinsam mit den restlichen Basismetallen des Altfahrzeugs im Grossshredder abgetrennt und in Metallfraktionen (Stofffluss 12) gesammelt, welche danach in Prozesse 15 und 18 weiter verwertet und zurückgewonnen werden. Beim Schreddern entstehen auch Abfälle in Form von RESH, die verbrannt werden (Prozess 13). Schlacke aus RESH kann geringe Mengen an Metallen enthalten, die teilweise in speziellen Anlagen zurückgewonnen werden können (Prozess 14).

Durch den Szenario "EEG Ausbau" können verstärkt Sekundärmaterialien zurückgewonnen und der Anteil der in der KVA thermisch verwerteten Materialien kann durch das getrennte Recycling von EEG (Prozess 17) verringert werden. Abbildung 5 zeigt, wie der Prozess 17 im Materialverwertungsmodul modelliert ist. Es beinhaltet alle für das Ökobilanzmodul relevanten Recyclingprozesse, für die Umweltbelastungen bestimmt werden müssen.

Es lassen sich vier Prozessebenen identifizieren:

1. Ausbau und manuelle Zerlegung (P_5, P_{20})
2. Erste mechanische Behandlung (P_{21})
3. Zweite mechanische Behandlung (P_{23-25})
4. Rückgewinnung & Entsorgung (P_{22}, P_{26-29})

Die Prozessebenen 1 und 2 finden ausschliesslich in der Schweiz statt, während die Prozessebenen 3 und 4 teilweise ausserhalb der Schweiz stattfinden.

Der Prozess der manuellen Zerlegung (P_{20}) betrifft nur den Gerätetyp "Scheinwerfer": Hier wird geprüft, ob quecksilberhaltige Dioden enthalten sind, welche aus den Scheinwerfern entfernt und in einer spezialisierten Anlage entsorgt werden. Das ist allerdings nur bei bestimmten Scheinwerfertypen der Fall. Für alle restlichen Geräte gemäss der Liste im Anhang besteht nach jetzigem Kenntnisstand kein Bedarf an manueller Zerlegung. Die mechanische Bearbeitung (Prozess 18) erfolgt direkt nach der Demontage. Dabei werden die EEG in verschiedene Fraktionen aufgetrennt. Diese Verteilung ist aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung je nach Gerätetyp unterschiedlich. Die Fraktion "Kabelkupfer" ist spezifisch für die Gerätetypen Kabel. Für bestimmte Mischfraktionen wie "Fe/Cu" gibt es weitere mechanische Behandlungsschritte, bevor sie, wie die restlichen Fraktionen, in einem finalen Rückgewinnungsprozess behandelt werden, dessen Produkt sekundäre Metalle sind.

Zwischen den verschiedenen Behandlungsprozessen befinden sich die Transportprozesse (T_i), welche je nach Länge der Transportdistanz einen signifikanten Anteil an den gesamten Umwelteinflüssen des Recyclingsystems ausmachen können. Der Transport erfolgt stets auf der Strasse mit Lastfahrzeugen.

In Verbrennungsanlagen wird Eisen welcher im RESH enthalten ist, aus der Schlacke zurückgewonnen. Einige Schlackenaufbereitungsanlagen weisen die technische Ausrüstung auf, um bestimmte Nichteisen-Metalle wie Aluminium oder Kupfer aus der Schlacke ebenfalls teilweise zurückzugewinnen (siehe im Gesamtmodell in Abbildung 3, Prozess 14). Die Mengen an Basismetallen, die im RESH (und dann in der Schlacke) vorhanden sind, sind jedoch vernachlässigbar im Vergleich zu den Mengen, die in den spezifischen Metallfraktionen landen.

Die Rückgewinnung von Edelmetallen aus Kehrichtschlacke ist auch möglich, wie Mehr et al. in einer Studie von 2021 zeigte. RESH-Schlacke ist eine völlig andere Art von Material, und die darin enthaltenen Edelmetalle liegen wahrscheinlich in viel kleineren Partikeln vor, was ihre Rückgewinnung wesentlich weniger effizient macht. Eine Extrapolation auf die potentielle Rückgewinnung einzelner Metalle aus der Schlacke verbrannter EEG lässt sich mit der aktuellen Datenlage nicht abschätzen.

Aus diesen Gründen wird im vorliegenden Modul die Rückgewinnung von Metallen aus der Schlacke nicht berücksichtigt. Wie bereits Ergebnisse aus EVA I zeigen, ist eine verstärkte Separierung der Materialien vor einer thermischen Behandlung für die Rückgewinnung der Materialien vorzuziehen, da reinere Fraktionen produziert werden können. [2]

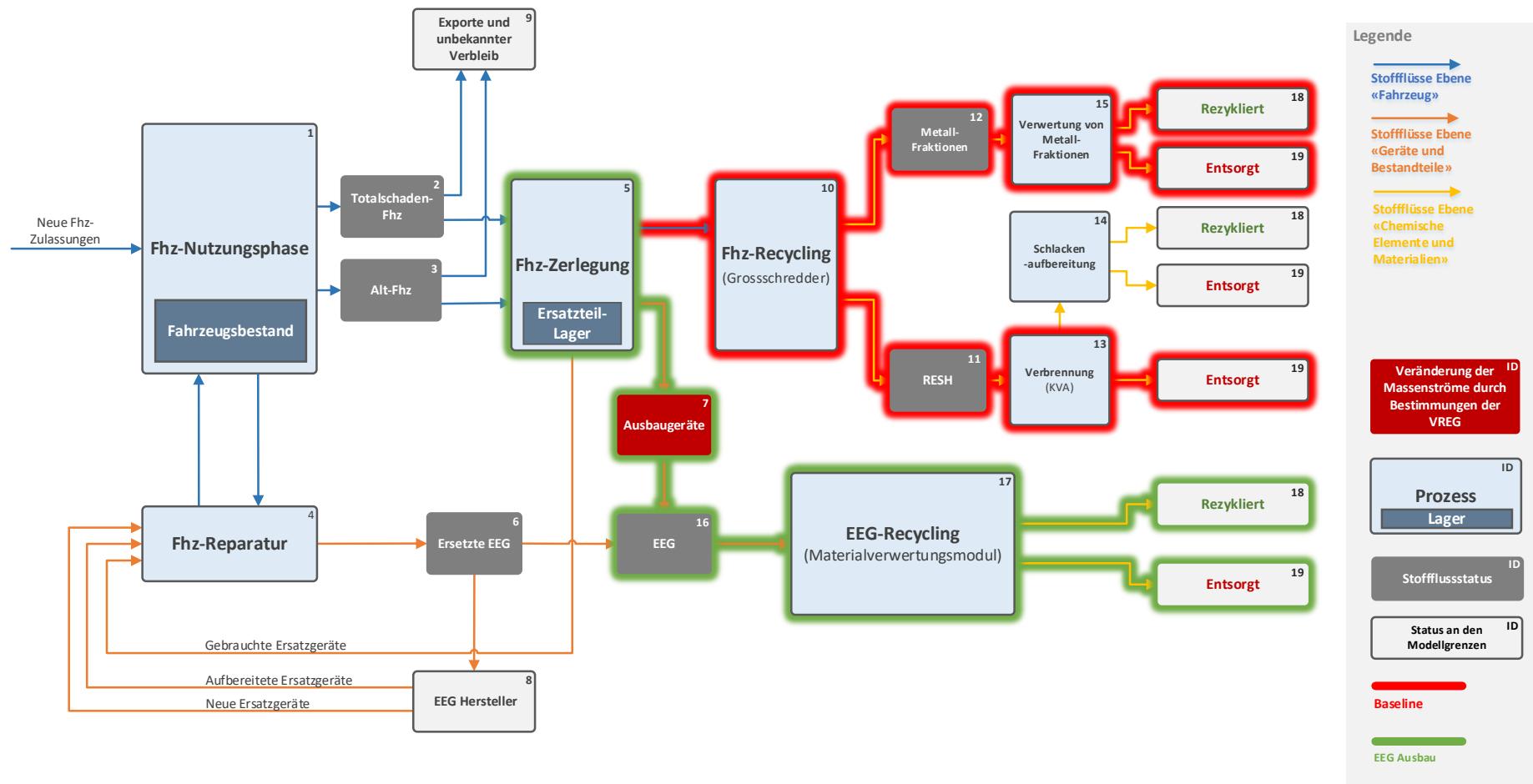


Abbildung 4: Umfang des Ökobilanzmoduls entlang des EEG Lebenszyklus

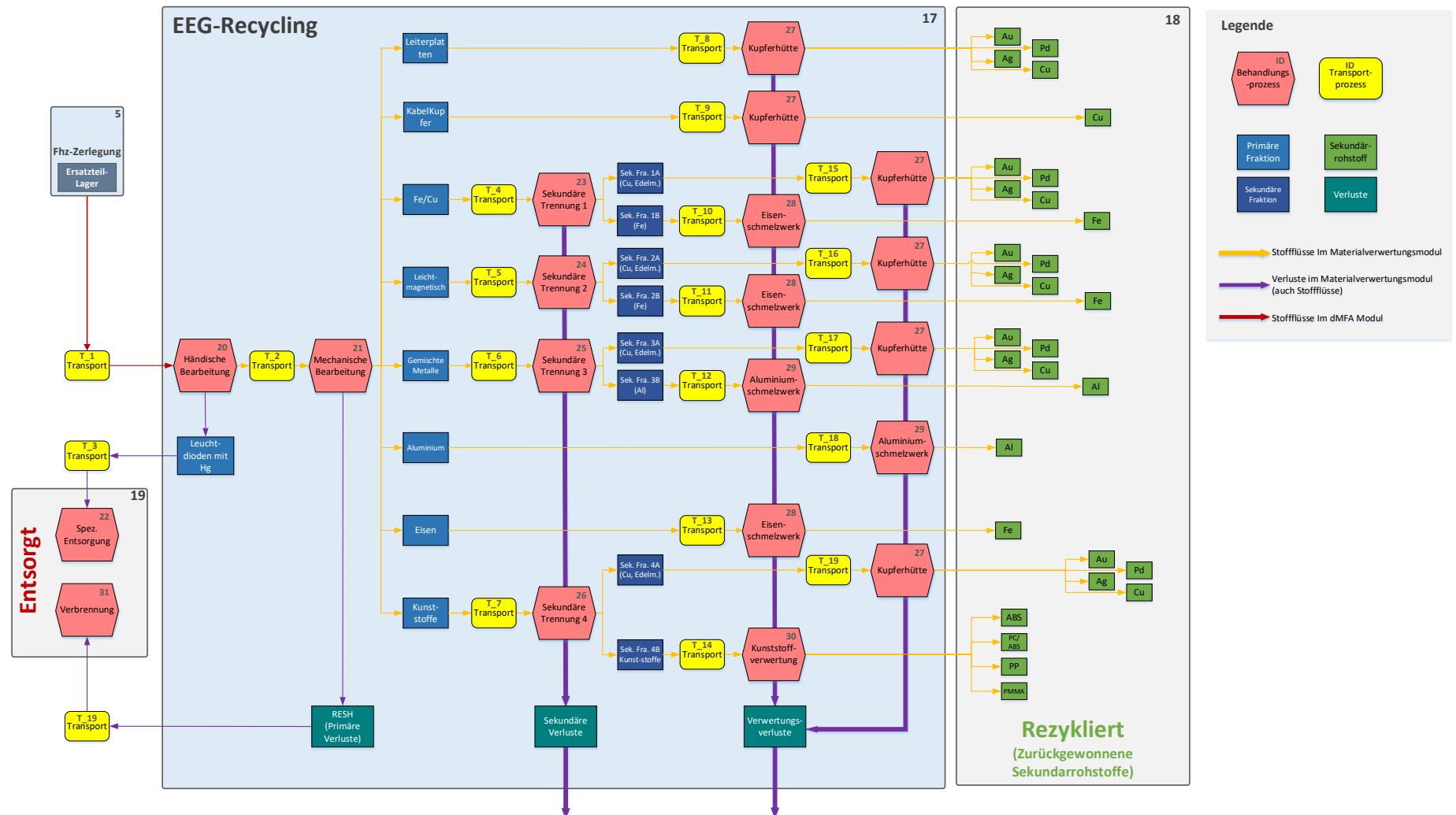


Abbildung 5: Prozesse des dmFA sowie Materialverwertungsmoduls relevant für das Ökobilanzmodul

2.3 Sachbilanz und Datenquellen

Für die Inventaranalyse der Ökobilanz benötigt es verschiedene Arten von Daten:

- A Umwelteinflüsse der Behandlungs- sowie Transportprozesse sowie der Substitution von Primärmaterialien
- B Zusammensetzungsdaten von EEG
- C Transferkoeffizienten, welche die Anteile der Materialien in den Behandlungs- und Transportprozessen definieren
- D Transportdaten, welche die Distanzen sowie Art des Transports der verschiedenen Transportprozesse bestimmen
- E Materialrückgewinnungsquoten, welche die technisch möglichen Rückgewinnungsquoten von Metallen und Kunststoffen festlegen, um die Menge der verlorenen bzw. zurückgewonnenen Materialien zu bestimmen

Die Daten stammen wie in Tabelle 5 zusammengefasst aus früheren Studien, Experteneinschätzungen sowie wie im Falle der Umwelteinflüsse aus der Datenbank Ecoinvent.

Ecoinvent enthält die Beschreibung sowie die damit verbundenen Daten über Wechselwirkungen mit der Umwelt (d.h. Elementarströme wie Rohstoffverbräuche und Emissionen) von mehr als 18'000 Prozessen mit internationaler Abdeckung und ist damit eine ideale Quelle für den Ökobilanzrechner.

Die in Tabelle 5 beschriebenen Datengruppen können in endogene und exogene Daten aufgeteilt werden:

- **Endogene Inputdaten** sind von den anderen Modulen des Gesamtmodells erzeugt, und fließen ins Ökobilanzmodul ein. Dabei handelt es sich nicht um Rohdaten, sondern um Modellierungsergebnisse.
- **Exogene Inputdaten** werden direkt von Referenzen und Experimenten gesammelt. Als solche werden sie speziell erfasst und direkt in das Modul integriert.

Tabelle 5: Arten von Ökobilanzdaten

Datengruppe	Datenquelle	Art	Bemerkungen
A	Ecoinvent (Version 3.8) [12]	Exogen	Es wurden Umweltdaten zu den Methoden CO ₂ -Emissionen, Ecological Scarcity 2021 (UBP) sowie Environmental Footprint (EF3.0) verwendet. Für gewisse Prozesse wurden existierende Prozesse modifiziert, um als besserer Proxy für einen im System definierten Prozess verwendet werden zu können.
B	Resultate aus EVA I [2], [11], [13]–[15], Experimente aus EVA II [16]	Endogen	Zusammensetzungen der EEG, Auf trennung der Gerätekategorien in die im heutigen Recyclingsystem relevanten Materialfraktionen

Datengruppe	Datenquelle	Art	Bemerkungen
C	Materialverwertungsmodul [9]	Endogen	Massenanteile bzw. Transferkoeffizienten basierend auf im heutigen Recyclingsystem existierenden Mischfraktionen, welche weitere Trennprozesse durchlaufen, um zu Reinfaktions für die Rückgewinnung zu gelangen
D	Austausch mit Recyclingbetrieben [17], Abschätzungen	Exogen	Anlehnung an das heutige Recyclingsystem für Elektronikschrott mit Behandlungsprozessen in der Schweiz und in Europa. Es wurde ein System mit unterschiedlichen durchschnittlichen Distanzen verwendet, siehe dazu Tabelle 7.
E	Resultate aus EVA I [2], [11], [13]–[15], Materialverwertungsmodul [9]	Endogen	Anlehnung an das heutige Recyclingsystem für Haushalt und IT-Geräte und die dort vorherrschenden Rückgewinnungsquoten nach Stand der Technik

Tabelle 6 zeigt die Datengruppe A welches die Proxyprozesse für die in Abbildung 5 beschriebenen Behandlungsprozesse (in Rot) enthält.

Tabelle 6: Im Ökobilanzmodul involvierte Behandlungsprozesse (Datentyp A)

Beschreibung des Behandlungsprozesses	Behandlungsprozesse (P_i)	Ecoinvent Prozess als Proxy verwendet	Modifikation
Ausbau Geräte	5	<i>Kein Prozess benötigt, vernachlässigbarer Einfluss</i>	
Händische Bearbeitung	20	<i>Kein Prozess benötigt, vernachlässigbarer Einfluss</i>	
Mechanische Bearbeitung	21	<i>waste electric and electronic equipment (GLO), treatment of</i>	Auf schweizerischen Energiemix angepasst
Verbrennungsanlage für gefährliche Abfälle	22	<i>hazardous waste, for incineration//[CH] treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration</i>	
Metallseparierung A	23	<i>iron scrap, sorted, pressed (CH), treatment of metal scrap, mixed for recycling, sorting</i>	
Metallseparierung B	24	<i>treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting (CH), treatment of metal scrap</i>	
Metall- und Plastikseparierung	25	<i>iron scrap, sorted, pressed (CH), treatment of metal scrap, mixed for recycling, sorting</i>	
Kupferrückgewinnung	26.0	<i>treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)</i>	Auf europäischen Energiemix angepasst
Goldrückgewinnung	26.1	<i>Gold {RoW}, treatment of precious metal from electronic scrap, in anode slime</i>	
Silberrückgewinnung	26.2	<i>Silver {RoW}, treatment of precious metal from electronic scrap, in anode slime</i>	

Beschreib des Behandlungsprozesses	Behandlungs- prozesse (P_i)	Ecoinvent Prozess als Proxy verwendet	Modifikation
Palladiumrückgewinnung	26.3	<i>Palladium {RoW}, treatment of precious metal from electronic scrap, in anode slime</i>	
Aluminiumrückgewinnung	27	<i>treatment of aluminium, cast alloy, (RER), treatment of aluminum scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refinery</i>	
Eisenrückgewinnung	28	<i>steel, low-alloyed (CH), steel production, electric furnace</i>	
Plastikrückgewinnung	29	<i>plastic flake, consumer electronics, for recycling {GLO}, market for plastic flake</i>	Auf europäischen Energiemix angepasst
Verbrennung in Verbrennungsanlage	30	<i>Treatment of residue from shredder fraction from manual dismantling, municipal waste incineration (CH)</i>	
Umweltbelastungen Transport mit Lastwagen pro kg*km	T_1 – T_19	<i>transport, freight, lorry 7.5 - 16 metric ton, EURO5, (RER); transport, freight, lorry 7.5 - 16 metric ton, EURO5</i>	

Wie in Tabelle 5 beschrieben, werden für die Distanzen der Transportprozesse (Abbildung 5 in Gelb) Durchschnittswerte verwendet, die basierend auf dem heutigen System für Elektroschrottrecycling in der Schweiz bestimmt wurden. Tabelle 7 zeigt die Einteilung der Transportprozesse in die vier definierten Durchschnittsdistanzen (Datentyp B).

Tabelle 7: Im Ökobilanzmodul involvierte Transportprozesse (Datentyp B)

Beschreib der Transportprozessparameter	Transportprozesse (T_i) im Systemmodell	Wert	Einheit
Transport "kurze Distanz" (Innerhalb CH)	T_1, T_2, T_3, T_10, T_11, T_13	75	km
Transport "mittlere Distanz" (CH & nahes Ausland)	T_12, T_18	150	km
Transport "mittel-lange Distanz" (Nahes Ausland)	T_5, T_6, T_7	250	km
Transport "lange Distanz" (Ausland EU)	T_4, T_8, T_9, T_15, T_16, T_17, T_19	500	km

Daten für die behandelten wie auch transportierten Materialmengen liefert das Materialverwertungsmodul. Die Materialströme für jeden im Systemmodell beschriebenen Behandlungsprozess, wie auch die Transportprozesse werden als Prozentanteil der funktionellen Einheit (1 kg) angegeben. Das Materialverwertungsmodul liefert Massenanteile für jede der vier Gerätetypen. Zudem wird für jede Gerätetypen die Verteilung der Fraktionen für die beiden in 0 beschriebenen Szenarien betrachtet. So kann der Recyclingaufwand für das Szenario "Baseline" und der Szenario "EEG Ausbau" für jede der vier Gerätetypen modelliert werden.

Tabelle 8: Beschreibung Massenanteile (Datentyp C) alle Werte in ANHANG C

Massenanteile Gerätekategorie j	ID für Gerätekategorie Parameter j	Parameter für Behandlungsprozess i	Parameter für Transportprozess i	Einheit
Scheinwerfer	1	w_{cat_1,P_i}	w_{cat_1,T_i}	%
Aktuatoren	2	w_{cat_2,P_i}	w_{cat_2,T_i}	%
Steuergeräte	3	w_{cat_3,P_i}	w_{cat_3,T_i}	%
Kabel	4	w_{cat_4,P_i}	w_{cat_4,T_i}	%

Für die vermiedenen Umweltbelastungen durch die Substitution der Primärmaterialien, werden die verwendeten Proxy-Prozesse für die Primärproduktion der im Untersuchungsrahmen festgelegten Materialien in Tabelle 9 zusammengefasst (Datentyp D). Die für die Edelmetalle verwendeten EcoInvent Prozesse entsprechen einem globalen Mix der Produktion. Der Anteil der Sekundärproduktion der Metalle in diesen Prozessen ist geringer als 1%, daher können die Prozesse verwendet werden ohne den Einfluss der Sekundärproduktion doppelt zu zählen und die Resultate der Ökobilanz zu verfälschen.

Tabelle 9: Im Ökobilanzmodul involvierte Prozesse der Primärproduktion der Materialien, zur Bestimmung des "avoided burden" (Datentyp D)

Material (mat _j)	Ecoinvent Prozess als Proxy verwendet
Eisen (Fe)	steel production, converter, unalloyed (RER), market for, cut-off
Aluminium (Al)	aluminum primary, liquid {GLO}, market for
Kupfer (Cu)	copper cathode {GLO}, market for, cut-off
Gold (Au)	gold,{GLO}, market for, cut-off
Silber (Ag)	silver,{GLO}, market for, cut-off
Palladium (Pd)	palladium,{GLO}, market for, cut-off
Polypropylen (PP)	polystyrene, general purpose {GLO} market for, cut-off
Polymethyl (PMMA)	polymethyl methacrylate, beads {GLO}, market for, cut-off
Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer, {GLO}, market for, cut-off
Polycarbonat/Acrylnitril-Butadien-Styrol (PC/ABS)	acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer, {GLO}, market for, cut-off

Daten der zurückgewonnenen Materialanteile pro Gerätekategorie liefert das Materialverwertungsmodul. Die zurückgewonnenen Massen beziehen sich auf die funktionelle Einheit einer bestimmten Gerätekategorie.

Tabelle 10: Beschreibung Massenanteile (Datentyp E) alle Werte in ANHANG C

Massenanteile Gerätekategorie j	ID für Gerätekate- gorie Parameter j	Anteil zurückgewonnene Mate- rialien pro Gerätekategorie j	Einheit
Scheinwerfer	1	w_{mat,cat_1}	%
Aktuatoren	2	w_{mat,cat_2}	%
Steuergeräte	3	w_{mat,cat_3}	%
Kabel	4	w_{mat,cat_4}	%

2.4 Mathematische Modellierung

2.4.1 Notation

Die folgenden Notationen werden verwendet, um die Berechnung des Impact Assessments im Model zu bezeichnen. Dabei werden Abkürzungen der englischen Begriffe *benefit* (B) und *recycling* (R) verwendet um die Umwelteinflüsse zu bezeichnen.

Tabelle 11: Notationen für die Modulparameter

Symbol	Parameter	Mögliche Werte/Einheit
B	Umweltnutzen durch Substitution von Primärmaterialien (avoided burden) pro funktionelle Einheit	CO2eq / UBP / Eco-Indicator pro kg
R	Umweltbelastungen durch Recyclingaufwand pro funktionelle Einheit	CO2eq / UBP / Eco-Indicator pro kg
A	Nettoumweltnutzen (B-R)	CO2eq / UBP / Eco-Indicator pro kg
P_i	Behandlungsprozess i	Siehe Tabelle 6
T_i	Transportprozess i	Siehe Tabelle 7
cat_j	Gerätekategorie j	j = {Scheinwerfer, Aktuatoren, Steuergeräte, Kabel}
d_i	Geräteeinheit eines Gerätetyps i	Siehe Liste Anhang A
mat_i	Material i	Siehe Tabelle 9
w	Massenanteil	{0 - 1}
m	Masse	kg
$scen$	Szenario	"Baseline", "EEG Ausbau"

Tabelle 12: Modulparameter

Modul	Symbol	Parameter	Mögliche Werte/Einheit
Ökobilanzmodul	R_{P_i}	Umweltbelastungen eines Behandlungsprozesses i	CO2eq / UBP / Eco-Indicator
	R_{T_i}	Umweltbelastungen eines Transportprozesses i	CO2eq / UBP / Eco-Indicator
	B_{mat}	Umweltnutzen pro kg substituiertes Material	CO2eq / UBP / Eco-Indicator
	$A_{cat_j}^{scen}$	Netto-Umweltnutzen nach Abzug der Umwelteinflüsse pro Gerätekategorie j	CO2eq / UBP / Eco-Indicator / kg Gerätekategorie
	m_{d_i}	Durchschnittliche Masse Geräteeinheit eines Gerätetyps i	kg
	$A_{d_i}^{scen}$	Netto-Umweltnutzen nach Abzug der Umwelteinflüsse pro Geräteeinheit eines Gerätetyps i	CO2eq / UBP / Eco-Indicator
	$A_{d,t=ref}^{scen,veh}$	Netto-Umweltnutzen nach Abzug der Umwelteinflüsse Geräteeinheit eines Gerätetyps pro Fahrzeug im Referenzjahr t = ref	CO2eq / UBP / Eco-Indicator
	$A_{cat_j}^{Gesamt}$	Umweltnutzen Szenario "EEG Ausbau" gegenüber Szenario "Baseline" pro funktionelle Einheit pro Gerätekategorie j	CO2eq / UBP / Eco-Indicator pro kg

Modul	Symbol	Parameter	Mögliche Werte/Einheit
Materialverwertungsmodul	$A_{d,t=ref}^{Gesamt,veh}$	Umweltnutzen Szenario "EEG Ausbau" gegenüber Szenario "Baseline" pro Geräteeinheit eines Gerätetyps pro Fahrzeug in der Gesamt-Fahrzeugflotte, im Referenzjahr t=ref	CO2eq / UBP / Eco-Indicator
	w_{cat_j,P_i}	Massenanteil von Gerätetekategorie j im Behandlungsprozess i	%
	w_{cat_j,T_i}	Massenanteil von Gerätetekategorie j im Transportprozess i	%
	w_{mat_i,cat_j}	Massenanteil zurückgewonnenes Material i der Gerätetekategorie j	%
dMFA-Modul	$k_{5-7,d}^{dev}$	Anteil jedes Gerätetyps, der für die Wiederverwendung demontiert wird	%
	$n_{d,t=ref}^{dev}$	Durchschnittliche Anzahl eines Geräts pro Fahrzeug in der Gesamt-Fahrzeugflotte, im Referenzjahr t=ref	{0 – n}

2.4.2 Modellgleichungen

Tabelle 13 beschreibt anhand der in Tabelle 11 verwendeten Notationen die mathematischen Zusammenhänge und Modellgleichungen der Analyse. Die Berechnung des Recyclingaufwands pro Gerätetekategorie erfolgt durch die Multiplikation der Transferkoeffizienten (Datentyp C) mit den Umweltbelastungen der definierten Behandlungs- und Transportprozesse (Datentyp A). Der gesamte Recyclingaufwand ergibt sich aus der Summe aller Behandlungs- und Transportprozesse.

Tabelle 13: Modellgleichungen Ökobilanzanalyse

Beschreibung	Gleichungen	Einheit
Umweltbelastungen durch Recyclingaufwand: Umweltbelastungen pro Gerätetekategorie j durch Summe der Umweltbelastungen aller Behandlungs- und Transportprozesse i	$R_{cat_j} = \sum_{i=1} (R_{P_i} * w_{cat_j,P_i}) + \sum_{i=1} (R_{T_i} * w_{cat_j,T_i})$	Pro funktionelle Einheit [1kg]
Umweltnutzen durch Substitution von Primärmaterialien: Umweltbelastungen pro Gerätetekategorie j durch Summe des Umweltnutzens der Masse aller zurückgewonnenen Materialien pro Gerätetekategorie j	$B_{cat_j} = \sum_{i=1} (B_{mat_i} * w_{mat_i,cat_j})$	Pro funktionelle Einheit [1kg]
Netto Umweltnutzen: Umweltbelastungen nach Abzug der Umwelteinflüsse pro Gerätetekategorie j	$A_{cat_j}^{scen} = B_{cat_j} - R_{cat_j}$	Pro funktionelle Einheit [1kg]
Netto Umweltnutzen: Absoluter Umweltnutzen nach Abzug der Umwelteinflüsse pro Gerätetyp i	$A_{d_i}^{scen} = A_{cat_j}^{scen} * m_{d_i}$	Pro Gerätetyp [kg]
Netto Umweltnutzen: Umweltbelastungen pro Gerätetyp i in einem durchschnittlichen Fahrzeug	$A_{d,t=ref}^{scen,veh} = A_{d_i}^{scen} * (1 - k_{5-7,d}^{dev}) * n_{d,t=ref}^{dev}$	Pro Gerätetyp [kg]
Szenarienvergleich: Zusatznutzen Szenario "EEG Ausbau" funktionelle Einheit pro Gerätetekategorie j	$A_{cat_j}^{Gesamt} = A_{cat_j}^{EEG} - A_{cat_j}^{baseline}$	Pro funktionelle Einheit [1kg]

Beschreibung	Gleichungen	Einheit
Szenarienvergleich: Zusatznutzen Szenario "EEG Ausbau" pro Gerätetyp eines Gerätetyps i pro durchschnittliches Fahrzeug	$A_{d,t=ref}^{Gesamt,veh} = A_{d,t=ref}^{EEG,veh} - A_{d,t=ref}^{baseline,veh}$	Pro Gerätetyp [kg]

Die Berechnung des Gesamt Netto-Umweltnutzens eines Geräts pro Fahrzeugs wird für die beiden Szenarien "Baseline" und "EEG Ausbau" einzeln berechnet und im Berechnungstool gegenübergestellt. Die Differenz der beiden Szenarien entsprechen dem Umweltnutzen pro Gerätetyp durch den Szenario "EEG Ausbau".

2.5 Grenzen des Ökobilanzmoduls

Der Aussagekraft des Moduls sind folgende Grenzen gesetzt:

- Bei einzelnen Gerätetypen fehlen Daten zum durchschnittlichen Aufkommen pro Fahrzeug. Hier wurden Einschätzungen vorgenommen. Beispielsweise liegt die Funktion vieler Gerätetypen nahe, dass nur ein Gerät dieses Typs pro Fahrzeug benötigt wird. Beispiel dazu ist die Klimaanlage. Bei Gerätetypen die spezifisch für einen Antriebstyp sind (beispielsweise der Inverter bei Elektrofahrzeugen), wird der Anteil dieses Antriebstyps in der jetzigen Schweizer Fahrzeugflotte verwendet.
- Die Modellierung bestimmt die Umweltbelastungen der Gerätekategorien und verwendet die Ergebnisse als Basis für die Berechnung der Gerätetypen. Dies bedeutet, dass für jedes Gerät, welches beispielsweise der Kategorie Aktuatoren zugehört, als Ausgangslage für die Berechnung der Umweltbelastungen dieses Gerätetyps die Umwelteinflüsse pro Kilo der Gerätekategorie Aktuatoren verwendet und mit der durchschnittlichen Masse des Gerätetyps multipliziert werden. Eine Ökobilanz für jeden einzelnen Gerätetyp ist aufgrund fehlender Daten zur Zusammensetzung zum heutigen Zeitpunkt nicht möglich. Die Behandlung eines einzelnen Gerätetyps in einer Recyclinganlage kann allerdings als unwahrscheinlich eingeschätzt werden, da die Verarbeitung von Mono-Inputfraktionen häufig zu schlechterer Trennung der Fraktionen und grösseren Verlusten führt. Dies wird daher von Recyclingunternehmen üblicherweise nicht praktiziert.
- Das Gesamtmodell stellt eine Vereinfachung der Realität dar, da alle Gerätetypen auf ein repräsentatives Durchschnittsgerät reduziert werden. So kann das Modul nicht die gesamte Vielfalt der verschiedenen Geräte aller Fahrzeugmodelle und Marken darstellen, da je nach Grösse und Preisklasse des Fahrzeugs Geräte wie Scheinwerfer in Masse und Komplexität stark unterschiedlich sein können. Ein Kleinwagen besitzt beispielsweise eher kleine Frontscheinwerfer im Bereich 2-3 kg mit Grundfunktionen, während bei einem Geländewagen die Frontscheinwerfer 4-5 kg schwer sein und eine Vielzahl an zusätzlichen Lampen, Elektromotoren zur präzisen Ausrichtung der Scheinwerfer und weiteren Funktionen aufweisen können.

- Die Ergebnisse hängen davon ab, wie gut der EEG-Recyclingprozess im Materialverwertungsmodul modelliert wird, sowie davon, wie gut das dmFA-Modul die Fahrzeug- und EEG-Massenflüsse im Autorecyclingsystem modelliert. Die Limitierungen dieser Bestandteile des Gesamtmodells gelten somit auch für das Ökobilanzmodul.
- Die Ergebnisse des Ökobilanzmoduls sind nur so lange gültig, wie die Inputdaten die Realität korrekt wiedergeben. Für zukünftige Verwendungen des Ökobilanzmoduls müssen die Inputdaten eventuell aktualisiert werden.
- Die Analyse umfasst nur Materialien, für welche im heutigen System Rückgewinnungsverfahren existieren. Einzelne seltene Technologiemetalle wie Neodym, welche ebenfalls in EEG enthalten sind, können nicht in die Analyse einbezogen werden.
- Quecksilberhaltige Dioden wurden nicht berücksichtigt. Allerdings enthält nur ein Teil der Scheinwerfer Quecksilber. Zudem ist nicht bekannt, was im heutigen Altfahrzeugrecyclingsystem mit dem Quecksilber geschieht. Dies macht. Das Szenario "EEG-Ausbau" hat aber im Prinzip für die Scheinwerfer den Vorteil, dass Quecksilber abgeschieden und fachgerecht entsorgt wird. Dieser Effekt wurde allerdings im Ökobilanzmodul nicht quantifiziert, weil einen Vergleich mit dem entwickelten Szenario "EEG Ausbau" aus diese Gründe schwierig ist

3 Ergebnisse

3.1 Umwelteinflüsse der Szenarien "Baseline" und "EEG Ausbau"

Die Resultate der Analyse der Umwelteinflüsse für die übergeordneten Gerätekategorien ist in den folgenden Tabellen und Grafiken dargestellt. Dabei werden die Szenarien "Baseline", und "EEG Ausbau" einander gegenübergestellt.

Tabelle 14 zeigt die Resultate des Impact Assessment der Ökobilanz für die Gerätekategorien Scheinwerfer, Aktuatoren, Steuergeräte sowie Kabel pro funktionelle Einheit (1 kg).

Tabelle 14: Umweltnutzen nach Szenario für die Gerätekategorien pro funktionelle Einheit

Szenario	Gerätekategorie	GWP ³ [kg CO ₂ eq]	UBP21 ⁴	EF3.0 ⁵
"Baseline"	Scheinwerfer	-0.67	5.33E+02	1.51E-04
	Aktuatoren	2.81	6.57E+03	6.40E-04
	Steuergeräte	2.85	6.14E+03	5.47E-04
	Kabel	-0.08	1.97E+04	6.42E-03
"EEG Ausbau"	Scheinwerfer	4.96	1.61E+04	3.19E-03
	Aktuatoren	4.38	1.01E+04	1.24E-03
	Steuergeräte	5.23	2.02E+04	4.16E-03
	Kabel	-0.08	1.97E+04	6.42E-03
Netto-Umweltnutzen (Differenz)	Scheinwerfer	5.65	1.56E+04	3.04E-03
	Aktuatoren	1.58	3.50E+03	5.97E-04
	Steuergeräte	2.39	1.41E+04	3.62E-03
	Kabel	0.00	0.00E+00	0.00E+00

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse aus Tabelle 14 und vergleicht Umweltbelastung und Umweltnutzen. Im Szenario "Baseline" bleiben die EEG in den Altfahrzeugen, als sie in Autoshreddern behandelt werden. In diesen Anlagen werden die Basismetalle gut zurückgewonnen, insbesondere Eisen und Aluminium und in gewissem Masse auch Kupfer. Der grösste Teil der STM geht jedoch verloren, da sie im RESH landen, der verbrannt wird. Im Szenario "EEG Ausbau" werden die EEG getrennt und in E-Schrott-Recyclinganlagen behandelt. Diese sind so optimiert, dass neben den Basismetallen auch einige STM (wie Au, Ag, Pd) und bestimmte Kunststoffe zurückgewonnen werden können. Im Szenario "EEG Ausbau" können mehr Sekundärrohstoffe aus EEG gewonnen werden als im Szenario "Baseline".

Die Umweltbelastung ist verursacht durch die negativen Auswirkungen der verschiedenen Prozesse die Umwelt (sogenannte "Behandlungsaufwand", in der Grafik negativ). Diese Prozesse umfassen Transport, mechanische Vorbehandlung, Rückgewinnungsprozesse sowie Verbrennung von Restmaterial. Der Umweltnutzen ergibt sich durch die Rückgewinnung von Sekundärmaterialien und somit durch die Substitution von Primärmaterialien. In der Abbildung sind Ergebnisse

³ Global Warming Potential

⁴ Methode der ökologischen Knappheit

⁵ Environmental Footprint

für CO₂-eq Emissionen sowie für Umweltbelastungspunkte (UBP) dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Umstellung von Szenario "Baseline" zu Szenario "EEG Ausbau" einen beträchtlichen Umweltnutzen bringt (Ausser für Kabel). Dies, da mehr Rohstoffe zurückgewonnen werden können und weniger Material verbrannt wird. In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die Verteilung der Umweltbelastungen der Behandlungsprozesse und der -Nutzen der zurückgewonnenen Materialien am Beispiel für UBP aufgeschlüsselt.

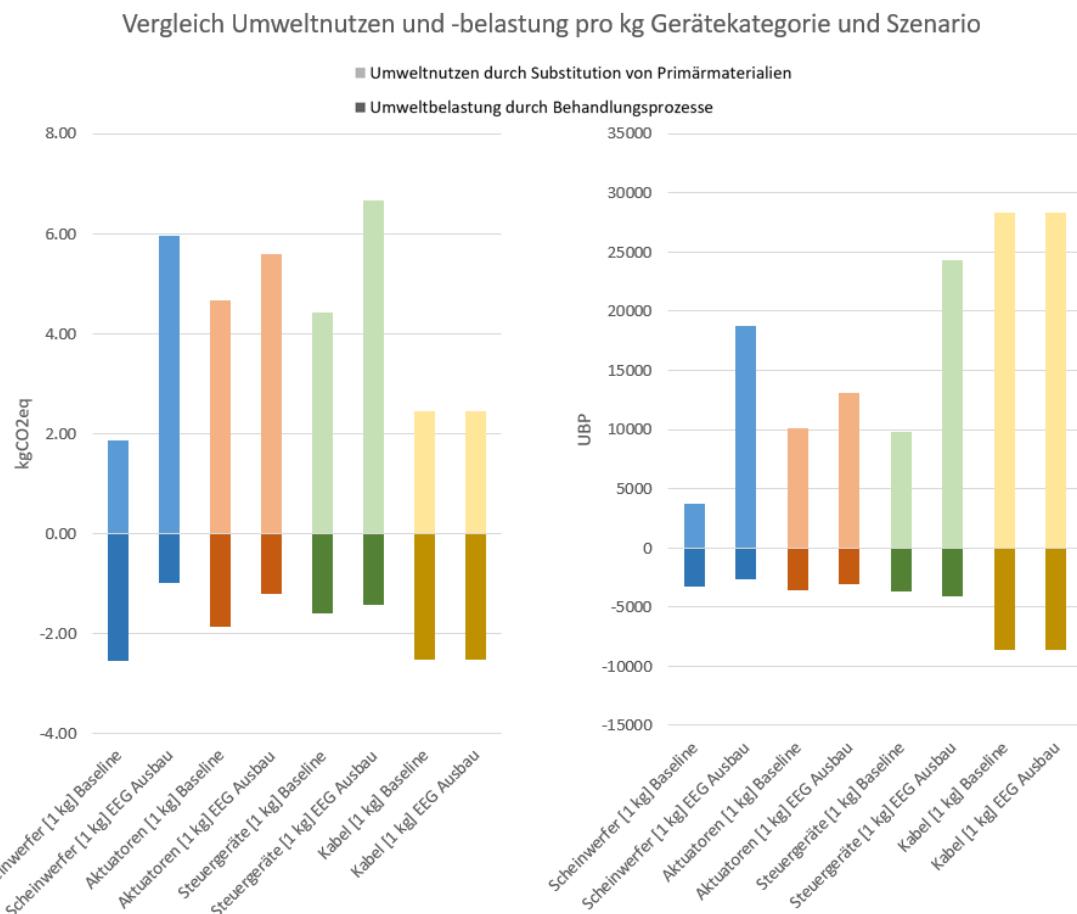


Abbildung 6: Vergleich von Umweltnutzen (helle Balken) und -belastung (dunkle Balken) pro kg nach Szenario und Gerätetyp für GWP & UBP

Obwohl Scheinwerfer, Aktuatoren und Steuergeräte unterschiedliche Zusammensetzungen aufweisen, zeigt die Ökobilanz einen ähnlichen Umweltnutzen pro funktionelle Einheit. Durch das EEG Recycling kann für jede der Kategorien, ausser für Kabel, ein Umweltnutzen erreicht werden. Für Kabel wird angenommen, dass bereits im heutigen System das enthaltene Kupfer zurückgewonnen wird. Der Kabelbaum enthält keine signifikanten Mengen an Zielkunststoffen, welche für die stoffliche Verwertung geeignet sind. Für Kabel führt die Verbrennung des Kunststoffes zu höheren Umweltbelastungen, als durch die Substitution des Kupfers an Umweltnutzen gewonnen wird.

Der Nettoumweltnutzen des Szenarios "EEG Ausbau" gegenüber dem heutigen System für die anderen Gerätetypen ist auf die erhöhte Rückgewinnung von Kupfer, Edelmetallen sowie

eines Teils der Kunststoffe zurückzuführen. Die Kategorie Scheinwerfer erzielt bei der Betrachtung der CO₂ Emissionen aufgrund des hohen Kunststoffgehalts den grössten Umweltnutzen durch im Szenario "EEG Ausbau". Es wird weniger Material verbrannt, was Emissionen einspart und zusätzlich können Primärkunststoffe ersetzt werden.

Abbildung 7 zeigt die Veränderung des Netto-Umweltnutzens durch die Umstellung des heutigen Systems (Szenario "Baseline") auf den Szenario "EEG Ausbau". In Bezug auf eingesparte CO₂ Emissionen kann für Scheinwerfer die höchste Verbesserung beobachtet werden. Bei der gesamtheitlichen Betrachtung der Umwelteinflüsse durch die Methode der Ökologischen Knaptheit ist der Zusatznutzen bei Steuergeräten ähnlich hoch. Dies ist auf die höheren Gehalte an Edelmetallen und Kupfer in den Steuergeräten zurückzuführen. Der Vergleich mit der GWP-Methode basiert nur auf den Emissionen von Treibhausgasen. Die UBP-Methode berücksichtigt ebenfalls diesen Faktor, bezieht aber auch andere Arten von Umweltschäden mit ein, wie z. B. die Toxizität von Kupfer oder chemischen Substanzen, die bei der Gewinnung von Edelmetallen aus Mineralien verwendet werden.

In der Bewertung mit UBP sind die Giftigkeit der Substanzen, welche beispielsweise bei der Gewinnung der Edelmetalle verwendet werden, und die Toxizität von Kupfer in der Umwelt zusätzliche Faktoren in der Analyse im Vergleich zur GWP Methode.

Wie in der Methodik erwähnt, können bestimmte Scheinwerfertypen quecksilberhaltige Dioden enthalten. Im Szenario "EEG Ausbau" werden diese systematisch ausgebaut und umweltgerecht entsorgt. Der Massenfluss von Quecksilber wurde aus technischen Gründen nicht quantifiziert und hat somit keinen Einfluss auf die Ergebnisse des Ökobilanzmoduls. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass das Szenario "EEG Ausbau" in dieser Hinsicht einen erheblichen Umweltnutzen im Vergleich zum Szenario "Baseline" bringt, bei dem alle Scheinwerfer einfach mit dem Auto geschreddert werden. Dieser Umweltnutzen wird jedoch in den vorliegenden Ergebnissen nicht abgebildet.

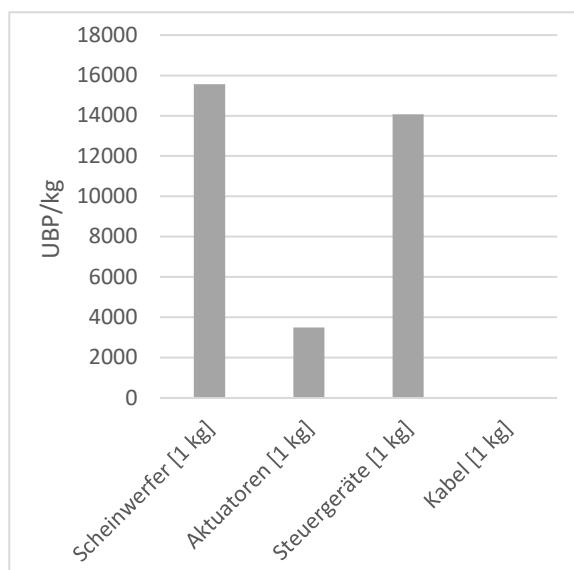
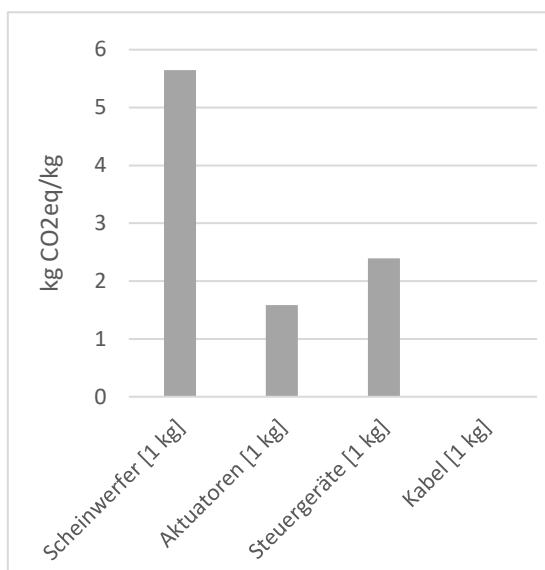


Abbildung 7: Umweltnutzen pro kg Gerätekategorie durch Szenario "EEG Ausbau" im Vergleich zum Szenario "Baseline"

Abbildung 8 zeigt die Umweltauswirkung der verschiedenen Behandlungsprozesse in UBP. Beim Szenario "EEG Ausbau" ist ein zusätzlicher Aufwand an Transportprozessen und Rückgewinnungsprozessen notwendig. Besonders Rückgewinnungsprozesse verursachen zusätzliche Umweltbelastungen. Es wird jedoch weniger Material verbrannt, was netto zu einer Reduktion der Umweltbelastung durch die Behandlungsprozesse des EEG Recyclings führt. Besonders bei der Gerätekategorie Scheinwerfer, die zu 70% aus Kunststoffen bestehen, wird im heutigen System nur sehr wenig Material zurückgewonnen, was zu einer grossen Menge an verbrannten Restmaterial führt, welches wiederum den Grossteil der verursachten Emissionen der Behandlungsprozesse für diese Kategorie verursacht. Die Umweltauswirkung der mechanischen Behandlung wie der Transportprozesse ist gegenüber der Verbrennung sowie Rückgewinnungsprozessen für alle Gerätekategorien gering.

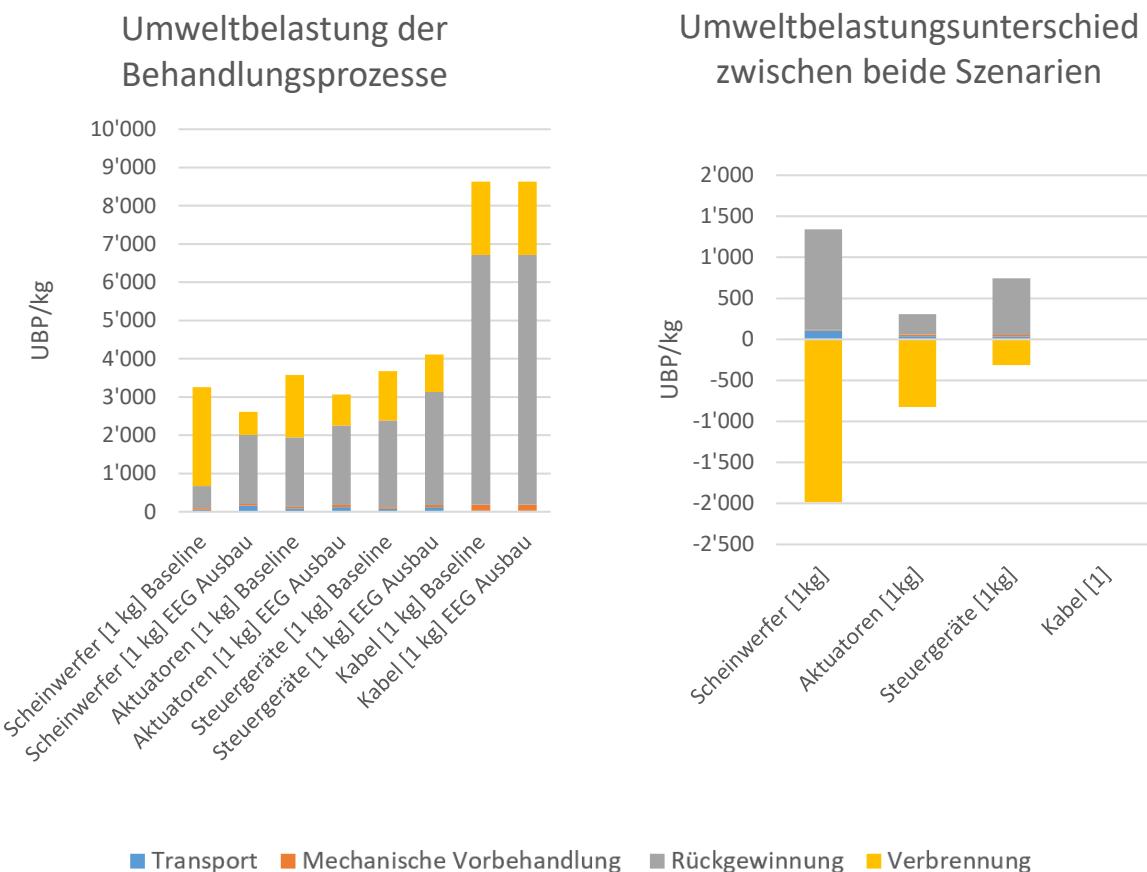


Abbildung 8: Links: Umweltbelastung der verschiedene Behandlungsprozesse pro kg EEG jeder Gerätekategorie für jedes Szenario. Rechts: Umweltbelastungsunterschied jedes Behandlungsprozess durch die Umstellung von Szenario Baseline auf das Szenario EEG Ausbau

Abbildung 9 zeigt die vermiedene Umweltbelastung (avoided burden) pro Gerätekategorie und Szenario generiert durch die Substitution von Primärmaterialien für die UBP-Methode. Mit Ausnahme der Kabel, von welchen in beiden Szenarien ausschliesslich ein Teil des enthaltenen Kupfers zurückgewonnen wird, ist für die restlichen Kategorien die Rückgewinnung von Aluminium

und Gold entscheidend. Für die Kategorie der Scheinwerfer kann im Szenario "EEG Ausbau" durch die Rückgewinnung eines Teils der enthaltenen Kunststoffe ein grosser Umweltnutzen generiert werden. Für die Kategorie der Steuergeräte ist die Rückgewinnung von Gold entscheidend. Die Edelmetalle Silber und Palladium, welche im Szenario "EEG Ausbau" zurückgewonnen werden können, sind für die Betrachtung des zusätzlichen Umweltnutzens nur von geringer Bedeutung.

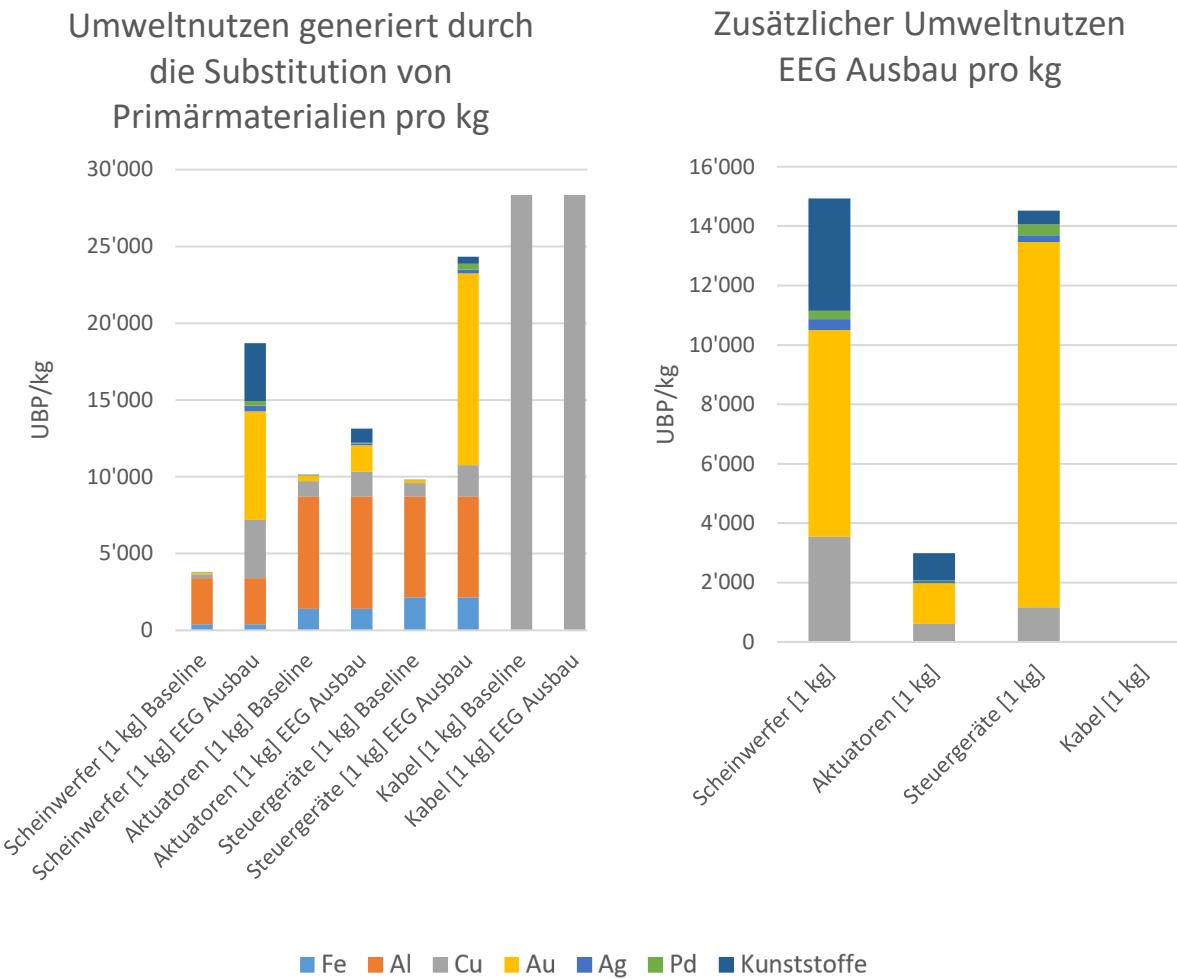


Abbildung 9: Links: Vermiedene Emissionen durch Substitution von Primärmaterialien pro kg Gerätekategorie für jedes Szenario. Rechts: Netto Gewinn an Umweltnutzen durch Umstellung vom Szenario Baseline auf das Szenario EEG Ausbau

Die Resultate ergeben ein Gesamtgewicht von 40 kg EEG pro durchschnittlichem Altfahrzeug in der Schweiz (gemäss Altfahrzeugmix im Referenzjahr 2021). Pro Altfahrzeug befinden sich durchschnittlich 8.90 kg Scheinwerfer, 19.87 kg Aktuatoren, 9.95 kg Steuergeräte sowie 1.3 kg Kabel. Tabelle 14 zeigt den potentiellen Gesamtumweltnutzen der Szenarien "Baseline" und "EEG Ausbau" pro Altfahrzeug anhand des Gesamtgewichts der EEG pro Gerätetyp. Dabei wird der Umweltnutzen in den drei verwendeten Methoden dargestellt.

Tabelle 15: Umweltnutzen pro Fahrzeug anhand vorhandener Masse pro Gerätekategorie

Szenario	Gerätekategorie	Gerätemasse pro Alt-Fhz [kg]	GWP ⁶ [kg CO ₂ eq]	UBP21 ⁷	EF3.0 ⁸
"Baseline"	Scheinwerfer	8.90	-6.14	4.74E+03	1.33E-03
	Aktuatoren	19.87	55.61	1.31E+05	1.27E-02
	Steuergeräte	9.95	28.24	6.11E+04	5.43E-03
	Kabel	1.30	-0.10	2.56E+04	8.30E-03
	Alle Geräte	40.01	77.60	2.22E+05	2.78E-02
"EEG Ausbau"	Scheinwerfer	8.90	44.06	1.43E+05	2.84E-02
	Aktuatoren	19.87	87.07	2.01E+05	2.45E-02
	Steuergeräte	9.95	52.01	2.01E+05	4.14E-02
	Kabel	1.30	-0.10	2.56E+04	8.30E-03
	Alle Geräte	40.01	183	5.71E+05	1.03E-01
Netto-Umweltnutzen (Differenz)	Scheinwerfer	8.90	50.3	1.39E+05	2.71E-02
	Aktuatoren	19.87	31.5	6.95E+04	1.19E-02
	Steuergeräte	9.95	23.8	1.40E+05	3.60E-02
	Kabel	1.30	0.0	0.00E+00	0.00E+00
	Alle Geräte	40.01	105.4	3.49E+05	7.49E-02

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der Tabelle 15 für die Gerätemassen der Gerätekategorien sowie gesamthaft für ein durchschnittliches Altfahrzeug. Da von der Masse her 50% der EEG den Aktuatoren zugeordnet werden können und sich der Umweltnutzen pro kg in einer ähnlichen Größenordnung wie bei den anderen Geräten bewegt (siehe Abbildung 6), ist der kumulierte Nutzen dieser Kategorie am höchsten.

In der Betrachtung der Umweltbelastungen verursacht durch Recyclingprozesse ist bei der Bewertung mit GWP die Verbrennung von Restmaterial dominant. So kann durch eine Reduktion des verbrannten Materials trotz zusätzlichen Transportstrecken und Recyclingaktivitäten eine Reduktion der Umweltbelastungen erzielt werden. In der Betrachtung mit UBP fallen die in Rückgewinnungsprozessen involvierten Chemikalien stärker ins Gewicht, daher ist für die Umweltbelastungen durch Behandlungsprozesse eine leichte Erhöhung der Belastung festzustellen.

Die händischen, mechanischen und weitergehenden Behandlungsprozesse der EEG sowie der Transport sind für den Einfluss des Recyclingaufwands von geringerer Bedeutung als die Rückgewinnungsprozesse sowie der Verbrennung von Restmaterial.

⁶ Global Warming Potential

⁷ Methode der ökologischen Knappheit

⁸ Environmental Footprint

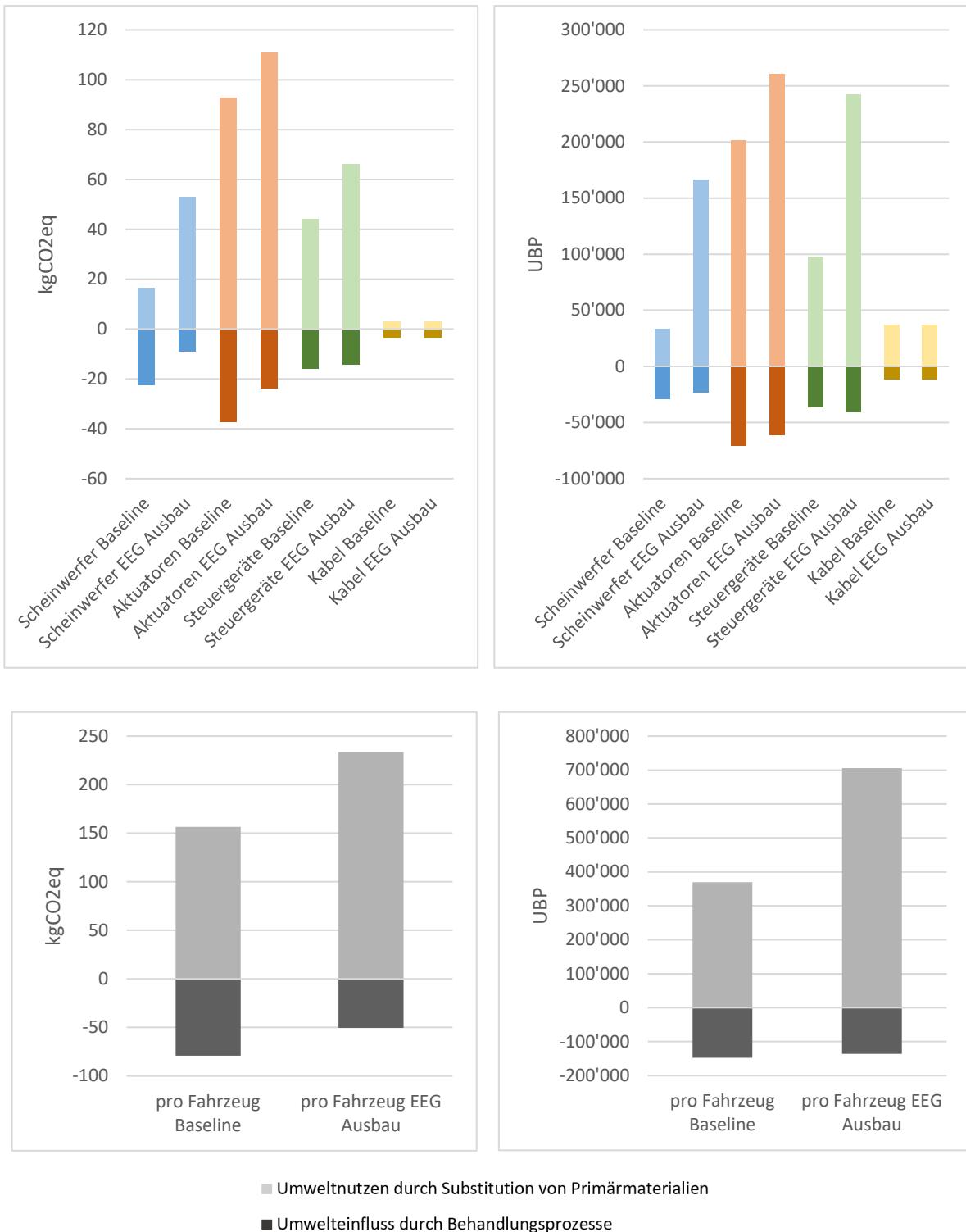


Abbildung 10: Vergleich von Umweltnutzen (helle Balken) und -einfluss (dunkle Balken) für GWP & UBP pro Fahrzeug

Aus den verschiedenen Umweltnutzen und -einflüssen aus Abbildung 10 im Vergleich der zwei Szenarien ergibt sich wie in Tabelle 14 beschrieben ein Netto-Umweltnutzen pro Gerätetyp und pro Fahrzeug. Dieser ist in Abbildung 11 dargestellt.

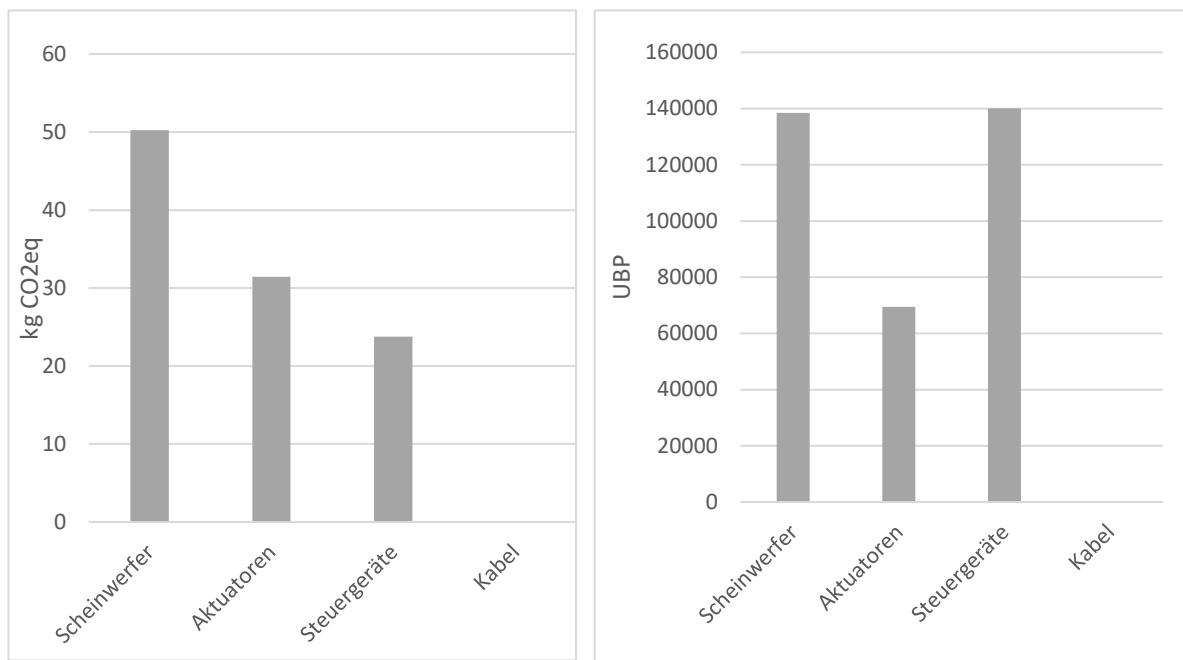


Abbildung 11: Umweltnutzen durch Szenario "EEG Ausbau" im Vergleich zum Szenario "Baseline" für Gesamtmasse EEG pro Fahrzeug jeder Gerätetyp

Abbildung 12 zeigt den Netto-Umweltnutzen durch den Vergleich der zwei Szenarien pro Gesamtmasse eines Geräts pro Altfahrzeug (im Referenzjahr 2021). Der Umweltnutzen des Anteils jeden Gerätetyps, der im heutigen System für den Ersatzteilmarkt bereits ausgebaut wird, wurde für die Berechnung des Umweltnutzens eines Gerätetyps abgezogen. Nach den Scheinwerfern an erster Stelle in der Rangliste, welcher durch die hohe Masse dieses einzelnen Gerätetyps verstärkt wird, folgen eine Anzahl an Steuergeräten.

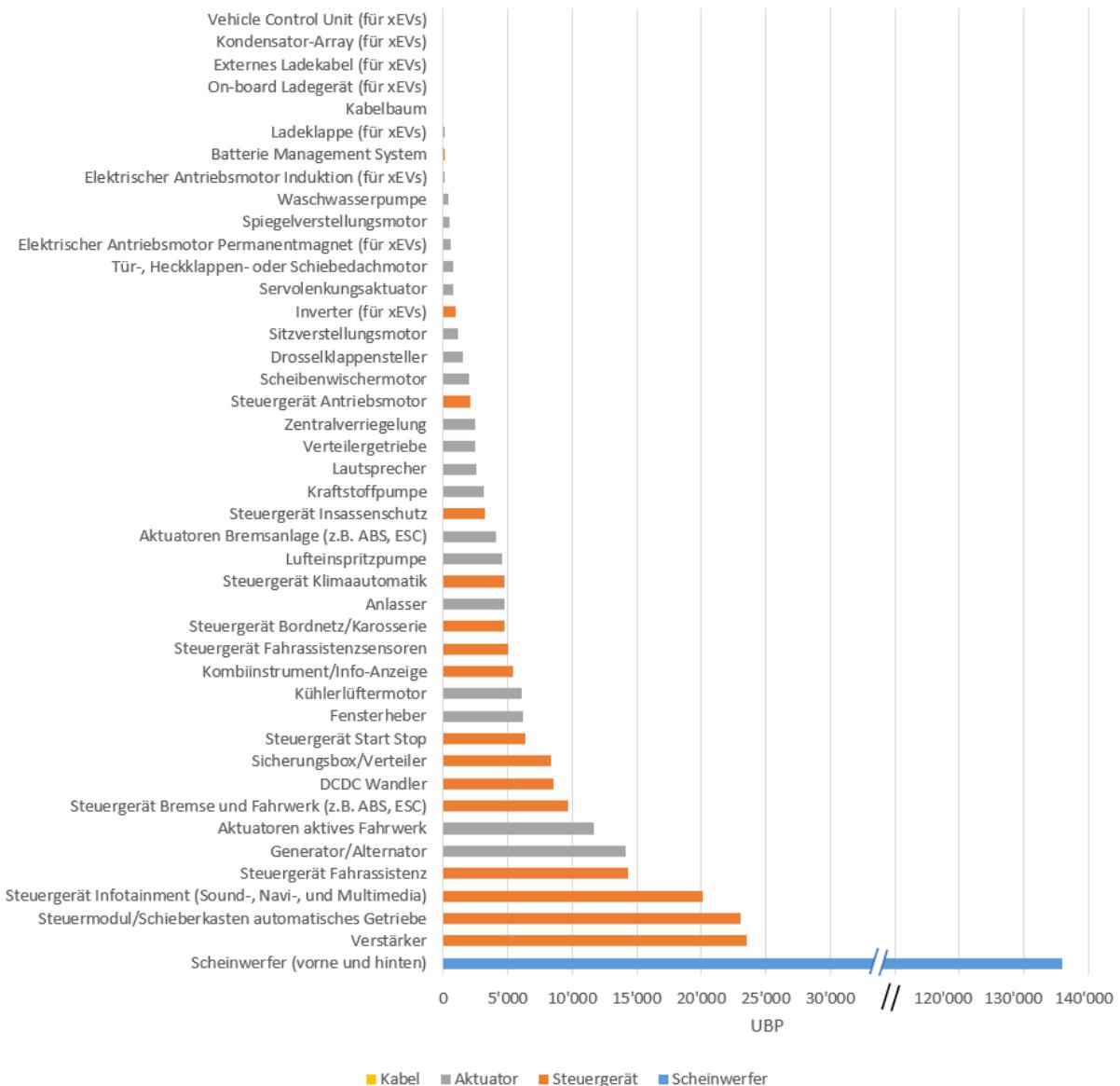


Abbildung 12: Umweltnutzen durch Szenario "EEG Ausbau" im Vergleich zum Szenario "Baseline" für Gesamtmasse EEG pro Fahrzeug für jeden Gerätetyp am Beispiel UBP (die UBP Achse für ist für bessere Sichtbarkeit gestaucht)

3.1.1 Vergleich mit EVA I

In EVA I wurde bereits eine Ökobilanz für bestimmte Fokusgeräte durchgeführt. Es wurden verschiedene Szenarien untersucht. Szenario 0 in EVA I entspricht der heutigen Situation (Referenzjahr 2021) und somit der Szenario "Baseline" in EVA II. Szenario 1 entsprach der Rückgewinnung der STM aus der Schlacke ohne Ausbau der Geräte. Dieses Szenario wurde in EVA II nicht weiterverfolgt. Szenario 2 aus EVA I beinhaltet den Ausbau der EEG sowie der mechanischen Bearbeitung und entspricht somit dem Szenario "EEG Ausbau" in EVA II. Die Systemgrenzen sind die gleiche. Folgende Geräte wurden in EVA I als Fokusgeräte untersucht (mit anderen Bezeichnungen in EVA I):

Tabelle 16: Liste der Fokusgeräte vom Projekt EVA I, mit EVA II Nomenklatur benannt

Fokusgeräte EVA I
Aktuatoren Bremsanlage
Alternator
Anlasser
Fensterhebermotor
Kühlerlüftermotor
Scheibenwischermotor
Steuergerät Antriebsmotor
Steuergerät Insassenschutz
Steuergerät Infotainment
Kombiinstrument

Der in der Ökobilanz in EVA I ermittelte Umweltnutzen, wenn die Fokusgeräte nach Szenario 2 statt nach Szenario 0 behandelt werden, entspricht einer Reduktion von 49% weniger UBP gegenüber Szenario 0. Der entsprechende Vergleich in EVA II, wenn die selben Geräte nach Szenario "EEG Ausbau" statt "Baseline" behandelt werden, entspricht 75% weniger UBP. Die unterschiedlichen Werte sind auf Veränderungen der Datenlage in der Ecoinvent Datenbank, verstärkter Berücksichtigung des Kunststoffrecyclings in EVA II sowie unterschiedliche Daten zu den Metallgehalten in den EEG zurückzuführen.

3.1.2 Interpretation

Die Ergebnisse zeigen die positive ökologische Bilanz der Altfahrzeugverwertung. Sowohl bei der heutigen Situation (Szenario "Baseline") wie bei einem EEG Ausbau und Recycling sind die vermiedenen Umweltbelastungen durch die Rückgewinnung von Materialien (und dadurch Substitution von Primärmaterialien) höher als der Recyclingaufwand. Im Szenario "EEG Ausbau" ist der Umweltnutzen deutlich höher, da weniger Verluste erzeugen werden und mehr Materialien und Elemente zurückgewonnen werden können.

Der Szenario "EEG Ausbau" zeigt über alle Gerätetypen, abgesehen von den Kabeln, einen zusätzlichen Umweltnutzen durch die erhöhten Rückgewinnungsquoten und die Reduktion des verbrannten Materials. Entscheidend sind Kunststoffe, die zurückgewonnen werden können. Die Rückgewinnung an Gold hat ebenfalls einen grossen Einfluss auf den Umweltnutzen.

3.2 Mögliche Weiterentwicklungen des Ökobilanzmoduls

Das Ökobilanzmodul ermöglicht die Bestimmung der Umweltwirkungen für verschiedene Gerätetypen, wie auch für eine beliebige EEG-Auswahl. Das Modul ermöglicht die Anpassung der Parameter, welche auf der Praxis des E-Schrott Recyclingsystems der Schweiz basieren. Zukünftige verbesserte Recyclingpraktiken, welche einen Einfluss auf die Rückgewinnungsquote der Materialien oder den verursachten Umweltaufwand bei der Rückgewinnung ausüben, können im Modul mit geringem Aufwand implementiert werden.

Sobald die Datenlage dies ermöglicht, könnten bei einer Weiterentwicklung des Moduls zusätzliche Gerätetypen aufgenommen werden, wie beispielsweise antriebsspezifische Gerätetypen aus

Elektrofahrzeugen. Es könnten zudem weitere Daten für die bereits berücksichtigten Gerätetypen hinzugefügt werden, wie die Aufteilung der EEG nach Fahrzeugmodell.

4 Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Bericht wird der ökologische Nutzen des Ausbaus und separaten EEG Recyclings (das Szenario "EEG Ausbau") im Vergleich zur heutigen Situation (das Szenario "Baseline") analysiert.

Diese Gegenüberstellung unterstützt die Bestimmung einer Liste an Gerätetypen, deren separate Verwertung als ökologisch sinnvoll erachtet wird. Zur Erhebung der Umweltwirkung des Ausbaus und separaten Recycling von jedem Gerätetypen wurde ein Modul entwickelt, welches den zusätzlichen Aufwand mit der vermiedenen Umweltbelastung durch die Substitution von Primärressourcen durch zurückgewonnene Materialien für die beiden Szenarien "Baseline" und "EEG Ausbau" vergleicht. Basierend auf Daten aus im Rahmen von EVA II durchgeföhrten Experimenten dient das Modul als Grundlage für die Berechnung des Netto-Umweltnutzens pro Gerätetyp auf der Basis der dazugehörenden Gerätekategorie (Aktuator, Steuergerät, Scheinwerfer und Kabel).

Im Szenario "Baseline" bleiben die EEG in den Altfahrzeugen, als sie in Autoshreddern behandelt werden. In diesen Anlagen werden die Basismetalle gut zurückgewonnen, insbesondere Eisen und Aluminium und in gewissem Masse auch Kupfer. Dies wird durch eine verstärkte Rückgewinnung des Kupfers aus Leiterplatten erreicht. Der grösste Teil der STM geht jedoch verloren, da sie im RESH landen, der verbrannt wird. Im Szenario "EEG Ausbau" werden die EEG getrennt und in E-Schrott-Recyclinganlagen behandelt. Diese sind so optimiert, dass neben den Basismetallen auch einige STM (wie Au, Ag, Pd) und bestimmte Kunststoffe zurückgewonnen werden können. Im Szenario "EEG Ausbau" können mehr Sekundärrohstoffe aus EEG gewonnen werden als im Szenario "Baseline".

Bei der Produktion von sekundären Basismetallen aus der Verwertung von Altmetallen wird deutlich weniger Energie benötigt im Vergleich zum Abbau. Im Falle von Aluminium ist im Schnitt zehnmal weniger Energie als bei der Primärproduktion notwendig [18]. Darüber hinaus hat das Recycling von Kunststoffen den doppelten Vorteil, dass die mit ihrer Verbrennung in KVA verbundenen Emissionen reduziert und Sekundärrohstoffe erzeugt werden. Beim Behandlungsaufwand verursachen die verschiedenen Rückgewinnungsprozessen (verursacht durch die in den Schmelzöfen benötigten Energiemengen) sowie die Verbrennung von RESH den grössten Teil der Umweltbelastungen. Die Prozesse des Ausbaus, des Transports wie auch der händischen, mechanischen und sekundären Vorbehandlung verursachen nur geringe Umweltbelastungen.

In beide Szenarien sind die Umweltnutzen deutlich höher als die mit den Recyclingprozessen verursachten Umweltbelastungen. Allerdings ist diese Differenz für drei Gerätekategorien (alle ausser "Kabel") im Szenario "EEG Ausbau" deutlich höher als im Szenario "Baseline". Das bedeutet, dass für diese Gerätekategorien der Wechsel vom Szenario "Baseline" zum Szenario "EEG Ausbau" ökologisch sinnvoll ist. Für Steuergeräte wie Scheinwerfer kann durch den EEG Ausbau und Recycling eine deutliche Erhöhung des Umweltnutzens durch die verbesserte Rückgewinnung von Edelmetallen wie Gold, Silber und Palladium aus Leiterplatten erreicht werden. Das Szenario "EEG-Ausbau" hat für die Scheinwerfer den zusätzlichen Vorteil, dass Quecksilber, das in einigen Dioden vorhanden ist, abgeschieden und fachgerecht entsorgt wird. Dieser Effekt

wurde allerdings im Ökobilanzmodul nicht quantifiziert. Für Aktuatoren kann eine kleinere Erhöhung beobachtet werden, da bereits im Szenario "Baseline" die Basismetalle Eisen, Aluminium und ein Teil des Kupfers zurückgewonnen werden.

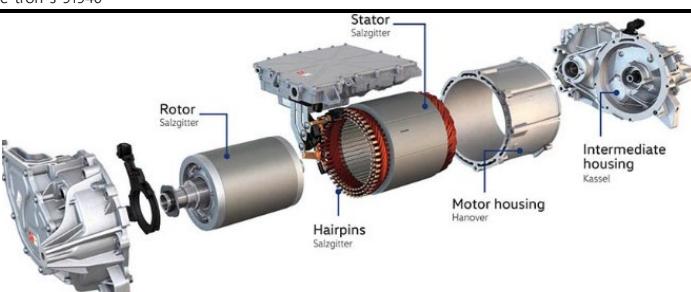
5 Referenzen

- [1] P. Wäger, R. Widmer, and A. Stamp, 'Scarce technology metals - applications, criticalities and intervention options', Federal Office of the Environment, Bern, Official report, Sep. 2011. [Online]. Available: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/fachinfo-daten/scarce_technologymetals-applicationscriticalitiesandintervention.pdf.download.pdf/scarce_technologymetals-applicationscriticalitiesandintervention.pdf
- [2] A. Haarman, R. Widmer, and R. Hischier, 'Projekt EVA: Elektronik – Verwertung – Altautos: Ökobilanz von STM-Rückgewinnungsoptionen - Schlussbericht zum Arbeitspaket C4', Empa, Schlussbericht, Jun. 2018.
- [3] B. für U. B. | O. fédéral de l'environnement O. | U. federale dell'ambiente UFAM, 'Seltene technische Metalle'. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-abfall/abfall--fachinformationen/abfallmengen-und-material--stofffluesse/seltene-technische-metalle.html> (accessed May 12, 2022).
- [4] U. N. E. Programme and I. R. Panel, Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. 2013. Accessed: May 16, 2022. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/8423>
- [5] C. Hagelüken and C. Meskers, 'Mining our computers - opportunities and challenges to recover scarce and valuable materials', Sep. 2008.
- [6] S. R. Mueller, P. A. Wäger, R. Widmer, and I. D. Williams, 'A geological reconnaissance of electrical and electronic waste as a source for rare earth metals', Waste Management, vol. 45, pp. 226–234, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.03.038.
- [7] E. Restrepo, A. N. Løvik, A. Haarman, and R. Widmer, 'Projekt EVA: Elektronik – Verwertung – Altautos: "Zusammenfassung der Aktivitäten und Resultate": Zusammenfassung EVA und Schlussbericht zum Arbeitspaket C5', Empa, St. Gallen, Jun. 2018.
- [8] A. N. Løvik, C. Marmy, E. Restrepo, and R. Widmer, 'Projekt EVA II: Elektronik – Verwertung – Altautos Dynamisches Stoffflussmodell Schlussbericht zum Arbeitspaket 3.1', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, May 2020.
- [9] C. Marmy, M. Capelli, and H. Böni, 'Projekt EVA II: Materialverwertungsmodul - Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2023.
- [10] C. Marmy et al., 'Projekt EVA II: Elektronik - Verwertung - Altautos Eingebettete Elektronikgeräte in Personenfahrzeugen Arbeitspaket 3.3: Ökobilanzmodul Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, Feb. 2022.
- [11] C. Marmy, M. Capelli, and H. Böni, 'Projekt EVA II: Wirtschaftsmodul - Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2023.
- [12] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema, 'The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology', Int J Life Cycle Assess, vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230, Sep. 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.
- [13] E. Restrepo, A. Løvik, and R. Widmer, 'Projekt "EVA" Szenarien und Dynamik: Schlussbericht zu der Arbeitspaket C3', St. Gallen, 2018.
- [14] E. Restrepo, A. Løvik, and R. Widmer, 'Projekt EVA: Existierender EAG Ausbau aus AltFhz; EAG Entnahmetests; Entfrachtungstests von AltFhz: Zwischenbericht zu den Arbeitspaketen A1, A2 und A3.', St. Gallen, Schweiz, 2017.
- [15] E. Restrepo, A. N. Løvik, R. Widmer, P. Wäger, and D. B. Müller, 'Effects of car electronics penetration, integration and downsizing on their recycling potentials', Resources, Conservation & Recycling: X, p. 100032, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.rcrx.2020.100032.
- [16] C. Marmy, N. Bartolomé, U. Marseiler, L. Toledo, M. Capelli, and H. Böni, 'Projekt EVA II: Versuche, Datenbeschaffung und Datenbanken - Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2023.
- [17] M. Capelli, 'Projekt EVA II Interview with Markus Stengele, Expert from E-waste recycling company (SOREC)'. Empa (not published), Oct. 2021.
- [18] 'Aluminium – Analysis', IEA. <https://www.iea.org/reports/aluminium> (accessed Jan. 17, 2023).

Anhang A Liste der identifizierten Gerätetypen

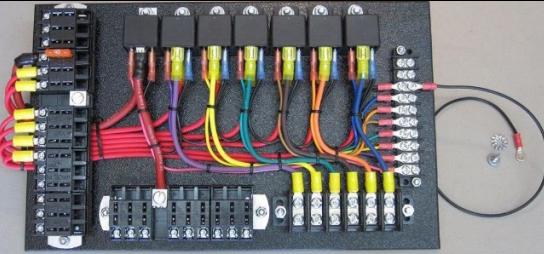
Bei einzelnen Geräten fehlen Daten, weshalb sie nicht im dynamischen Massenflussmodell und im Wirtschafts- und Ökobilanzmodul integriert sind. Dies betrifft besonders EEG welche spezifisch zu Elektrofahrzeugen sind (ID: 4, 7, 8, 19)

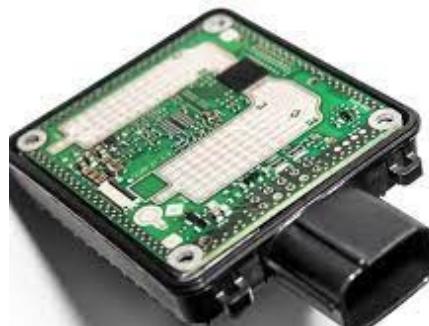
ID	01	
Gerätetyp		
Aktuatoren aktives Fahrwerk		
Standardbezeichnung		
AirSuspensionCompressorMotor		
Gerätekategorie		
Aktuator		
Quelle: http://www.air-suspensionparts.com/quality-10728514-w166-car-air-suspension-kits-air-spring-compressor-pump-a166320104.html		
ID	02	
Gerätetyp		
Aktuatoren Bremsanlage (z.B. ABS, ESC)		
Standardbezeichnung		
BrakeSystemActuator		
Gerätekategorie		
Aktuator		
Quelle: https://www.hella.com/techworld/de/Technik/Elektrik-Elektronik/ABS-ESP-Steuergeraete-fuer-Brems-und-Fahrdynamik-56049/		
ID	03	
Gerätetyp		
Anlasser		
Standardbezeichnung		
StarterMotor		
Gerätekategorie		
Aktuator		
Quelle: https://www.mein-autolexikon.de/elektrik/anlasser.html		
ID	4	
Gerätetyp		
Batterie Management System		
Standardbezeichnung		
BatteryManagementSystem		
Gerätekategorie		
Steuergerät		
Quelle: https://www.yovcart.com/Product/596055232405/		

ID	05	
Gerätetyp		
Drosselklappensteller		
Standardbezeichnung		
ThrottleActuator		
Gerätekategorie		
Aktuator		
Quelle: https://www.mein-autolexikon.de/elektronik/drosselklappe.html		
ID	06	
Gerätetyp		
DCDC Wandler		
Standardbezeichnung		
DCDCConverter		
Gerätekategorie		
Steuergerät		
Quelle: https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/leistungselektronik/hochspannungs-dc-dc-wandler-generation-3evo/		
ID	07	
Gerätetyp		
Elektrischer Antriebsmotor Induktion		
Standardbezeichnung		
BEVDriveMotorInduction		
Gerätekategorie		
Aktuator		
Quelle: https://www.audi-mediacenter.com/en/photos/detail/audi-e-tron-s-91940		
ID	08	
Gerätetyp		
Elektrischer Antriebsmotor Permanentmagnet		
Standardbezeichnung		
BEVDriveMotorPM		
Gerätekategorie		
Aktuator		
Quelle: https://www.wheelsjoint.com/a-lot-of-power-in-a-small-space-electric-motors-are-transforming-the-automotive-industry/		
ID	09	
Gerätetyp		
Fensterheber		
Standardbezeichnung		
ElectricWindowsMotor		
Gerätekategorie		
Aktuator		
Quelle: https://www.europarts.com/Parts/461538/Power-Window-Motor-and-Regulator-Assembly-Front-Driver-Left-WL41364/		

ID	10	
Gerätetyp		
Generator/Alternator		
Standardbezeichnung		
Alternator		
Gerätekategorie		
Aktuator		
Quelle: https://www.beupp.com/generator/what-is-the-difference-between-an-alternator-and-a-generator/		
ID	11	
Gerätetyp		
Inverter		
Standardbezeichnung		
Inverter		
Gerätekategorie		
Inverter		
Quelle: https://www.wogas.ch/spannungswandler-wechselrichter-auto-power-inverter-konverter-300w.html		
ID	12	
Gerätetyp		
Kombiinstrument/Info-Anzeige		
Standardbezeichnung		
CombinedInstrumentDisplay		
Gerätekategorie		
Steuergerät		
Quelle: https://www.autoteile-markt.de/shop/instrumente-tachometer		
ID	13	
Gerätetyp		
Kabelbaum		
Standardbezeichnung		
WiringHarness		
Gerätekategorie		
Kabelartiges Gerät		
Quelle: https://www.kurth-classics-autoparts.de/de/kabelbaume/746-motorkabelbaum-a1295406005.html		
ID	14	
Gerätetyp		
Kraftstoffpumpe		
Standardbezeichnung		
FuelPump		
Gerätekategorie		
Aktuator		
Quelle: https://www.mein-autolexikon.de/motor/kraftstoffpumpe.html		

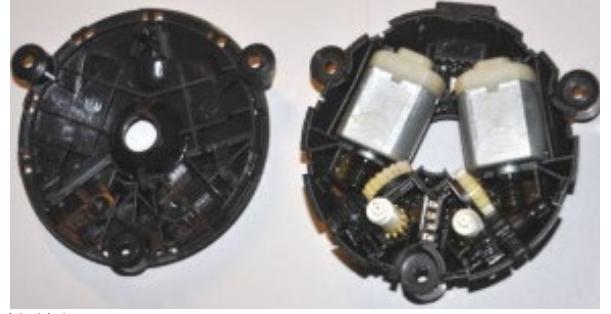
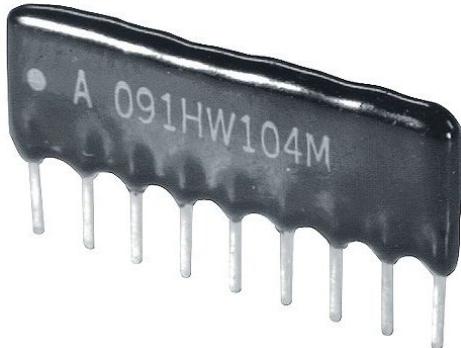
ID	15	
Gerätetyp		
Kühlerlüftermotor		
Standardbezeichnung		
HeaterAndACFanMotor		
Gerätekategorie		
Aktuator		
Quelle: https://www.autodoc.de/tyc/7489545		
ID	16	
Gerätetyp		
Lautsprecher		
Standardbezeichnung		
Speaker		
Gerätekategorie		
Aktuator		
Quelle: https://www.multiplanet.ch/lautsprecher-bass/fahrzeugspezifische-systeme-lautsprecher/mercedes1586/#page=1&&specialsOnly=0		
ID	17	
Gerätetyp		
On-board Ladegerät (Elektrofahrzeug)		
Standardbezeichnung		
BatteryCharger		
Gerätekategorie		
Steuergerät		
Quelle: https://wheele.de/produkt/on-board-charger/		
ID	18	
Gerätetyp		
Externes Ladekabel (Elektrofahrzeug)		
Standardbezeichnung		
ChargeCord		
Gerätekategorie		
Kabel		
Quelle: https://www.khonsevse.com/product/ev-1-phase-charger/		
ID	19	
Gerätetyp		
Scheibenwischermotor		
Standardbezeichnung		
WiperMotor		
Gerätekategorie		
Aktuator		
Quelle: https://www.b-parts.com/en/store/products/2343901/rear-wiper-motor-audi-a6-allroad-c6-4fh-32-fsi-quattro-4f995571b-e1-b6-8-1-2006-2007-2008-2009-2010-2011/		

ID	20	Gerätetyp Scheinwerfer (vorne und hinten)	
Standardbezeichnung		Light	
Gerätekategorie		Scheinwerfer	
Links: Quelle: https://www.pkwteile.de/ersatzteil/ruckleuchte Rechts: Quelle: https://www.hella.com/partnerworld/de/Produktprogramm/Fahrzeug-Beleuchtung/Hauptscheinwerfer-3214/			
ID	21	Gerätetyp Sicherungsbox/Verteiler	
Standardbezeichnung		FuseBox	
Gerätekategorie		Aktuator	
Quelle: https://www.tuningblog.eu/kategorien/tuning-wiki/sicherungskasten-255816/			
ID	22	Gerätetyp Sitzverstellungsmotor	
Standardbezeichnung		SeatMotor	
Gerätekategorie		Aktuator	
Quelle: https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/aktuatoren/sitzverstellantrieb/			
ID	23	Gerätetyp Steuergerät Antriebsmotor	
Standardbezeichnung		EngineControlUnit	
Gerätekategorie		Steuergerät	
Quelle: https://www.b-parts.com/en/store/products/4383599/engine-control-unit-ecu-vw-golf-v-1k1-19-tdi-0281013226-03g906021kh-e2-a1-25-1-2003-2004-2005-2006-2007-2008-2009-2010/			
ID	24	Gerätetyp Steuergerät Bordnetz/Karosserie	
Standardbezeichnung		BodyControlModule	
Gerätekategorie		Steuergerät	
Quelle: https://www.glistensky.shop/index.php?main_page=product_info&products_id=207473			

ID	25	
Gerätetyp	Steuergerät Bremse und Fahrwerk (z.B. ABS, ESC)	
Standardbezeichnung	BrakeSystemControlUnit SelfLevelingSuspensionController	
Gerätekategorie	Steuergerät	
Quelle: https://www.hella.com/techworld/de/Technik/Elektronik/ABS-ESP-Steuergeraete-fuer-Brems-und-Fahrdynamik-56049/		
ID	26	
Gerätetyp	Steuergerät Fahrassistenz	
Standardbezeichnung	AdaptiveCruiseControlController ElectronicPowerSteeringController ParkAssistantController	
Gerätekategorie	Steuergerät	
Quelle: https://www.programmainc.com/item_list.aspx?idcategory=38		
ID	27	
Gerätetyp	Steuergerät Fahrassistenzsensoren	
Standardbezeichnung	ParkingCameraController SignRecognitionCameraController ParkingRadarController	
Gerätekategorie	Steuergerät	
Quelle: https://www.hella.com/hella-com/assets/media_global/2018.08.10_HELLA_Geschaeftsbericht_2018_360_Autonom_DE_ge schuetzt.pdf		
ID	28	
Gerätetyp	Steuergerät Infotainment (Sound-, Navi-, und Multimedia)	
Standardbezeichnung	InfotainmentNavigationSystem NavigationSystem SoundSystem	
Gerätekategorie	Steuergerät	
Quelle: VW Display and Control Panel Genuine Volkswagen Part OE-Nr. 6C0-035-8, 399.90 € (bus-ok.de)		

ID	29	
Gerätetyp		
Steuergerät Insassenschutz (z.B. AirbagSteuerung)		
Standardbezeichnung		
AirbagController		
Gerätekategorie		
Steuergerät		
Quelle: https://www.endera.de/airbagsteuergeraet-reparatur-vw-golf-iv.html		
ID	30	
Gerätetyp		
Steuergerät Klimaautomatik		
Standardbezeichnung		
HabitacleClimateController		
SeatHeatingController		
Gerätekategorie		
Steuergerät		
Quelle: https://autodogs.de/produkt/bmw-e90-e91-klimabedienteil-bedienteil-klimaautomatik-6199260-klima-schalter/		
ID	31	
Gerätetyp		
Steuерmodul/Schieberkasten autom.		
Getriebe		
Standardbezeichnung		
TransmissionControlUnit		
Gerätekategorie		
Steuergerät		
Quelle: https://classicparts.de/Schieberkasten-fuer-4-Gang-Automatikgetriebe-Getriebekennbuchstabe-APCCBYCFAPECBZFCAPBCFA-Corrado		
ID	32	
Gerätetyp		
Waschwasserpumpe		
Standardbezeichnung		
WindshieldWasherPump		
Gerätekategorie		
Aktuator		
Quelle: https://www.biltema.dk/en-dk/car---mc/car-spares/washer-equipment/washer-pumps/washer-pump-2000038246		

ID	33	Gerätetyp Zentralverriegelung Standardbezeichnung DoorLockActuator Gerätekategorie Aktuator	
<small>Quelle: https://www.autodoc.de/autoteile/schlosser-aussen-10787</small>			
ID	34	Gerätetyp Verstärker Standardbezeichnung AudioAmplifier Gerätekategorie Steuergerät	
<small>Quelle: https://www.techinn.com/en/sony-xmn1004-car-amplifier/137910321/p</small>			
ID	35	Gerätetyp Luftein spritzpumpe Standardbezeichnung EngineAirInjectionPump Gerätekategorie Aktuator	
<small>Quelle: https://www.fcpeuro.com/products/bmw-air-pump-e46-pierburg-11727553056</small>			
ID	36	Gerätetyp Ladeklappe (Elektrofahrzeug) Standardbezeichnung PlugInsertPanel Gerätekategorie Aktuator	
<small>Quelle: https://akro-plastic.com/de/aktuelles/praxisbeispiele/ladeklappe-e-auto/</small>			
ID	37	Gerätetyp Tür-, Heckklappen- oder Schiebedachmotor Standardbezeichnung DoorHatchMotor SunroofMotor Gerätekategorie Aktuator	
<small>Quelle: https://www.amazon.de/T%C3%BCrschloss-Motorschloss-motorsperre-Lenkschloss-Radmotor/dp/B084P484W4</small>			

ID	38	
Gerätetyp	Servolenkungsaktuator	
Standardbezeichnung	PowerSteeringActuator	
Gerätekategorie	Aktuator	
Quelle: https://www.caranddriver.com/features/a27888229/power-steering/		
ID	39	
Gerätetyp	Spiegelverstellungsmotor	
Standardbezeichnung	MirrorMotor	
Gerätekategorie	Aktuator	
Quelle: https://w220.wiki/File:W220_exterior_mirror_motor_A2038202242_opened_inside.jpg		
ID	40	
Gerätetyp	Steuergerät Start Stop	
Standardbezeichnung	StartStopController	
Gerätekategorie	Controller	
Quelle: https://www.franceauto.pl/de_DE/p/Start-Stop-Steuergerat-Citroen-Berlingo-III-C3-II-C3-Picasso-C4-II-C4-Cactus-C4-Picasso-II-DS3-DS4-DS5-Peugeot-2008-208-3008-308-II-5008-508-Partner-III-9805721280/58524		
ID	41	
Gerätetyp	Kondensator-Array für EV	
Standardbezeichnung	CapacitorsEV	
Gerätekategorie	Controller	
Quelle: https://www.distrelec.ch/en/ceramic-capacitor-array-100nf-50v-20-hosonic-8c7-104m50x/p/16572366		
ID	42	
Gerätetyp	Verteilergetriebe	
Standardbezeichnung	TransferShiftActuator	
Gerätekategorie	Aktuator	
Quelle: https://bs-getriebetechnik.de/BMW-X3-Verteilergetriebe-generalueberholt-27103455137-27103455135-Bj-2003-2011		

ID 43

Gerätetyp

Vehicle Control Unit

Standardbezeichnung

VehicleControlUnit

Gerätekategorie

Controller



Quelle: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/fahrzeugcomputer/vehicle-control-unit/>

Anhang B Liste der EEG Bestandteile

Bestandteil	Name in Datenbank	Enthalten in	Enthaltene relevante Materialien
Leiterplatte	PCB	Aktuatoren, Scheinwerfer	Controller, Edelmetalle (Gold, Silber, Platin), Kupfer, Kunststoffe
Stecker	Cables and connectors	Controller	Kunststoffe, Kupfer
Motor	Motor	Aktuatoren	Eisen, Kupfer, Neodym
Bildschirm	Display	Controller	Kunststoffe, Glas
Fe-Teile	Fe-parts	Aktuatoren, Controller	Eisen
Al-Teile	Al-parts	Aktuatoren, Controller	Aluminium
Cu-Teile	Cu-parts	Aktuatoren, Controller	Kupfer
Licht/LED	Light-LED	Scheinwerfer	Glas, Kunststoffe, Quecksilber
Kunststoffgehäuse	Plastic-parts	Aktuatoren, Scheinwerfer	Controller, Kunststoffe
Magnete	Magnet	Aktuatoren	Eisen, Neodym
Andere Metallteile	Other metals	Alle Geräte	Andere Metalle
Kabel	Cables and connectors	Kabelbaum, Aktuatoren	Kunststoffe, Kupfer
Stecker zu elektrischem Kabel	Cable and connectors	Ladekabel Elektrofahrzeug	Kupfer
Rest	Rest	Alle Geräte	Gummi, Schaumstoff, Silikonteile, etc.

Komponente

Leiterplatte

Beschreibung

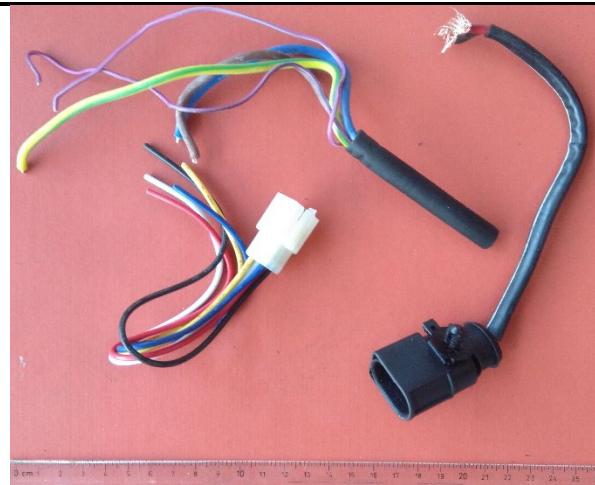
Eine Leiterplatte (engl. Printed circuit board, PCB) ist ein Träger aus Kunststoff für elektronische Bauteile (Kondensatoren, Prozessoren, elektrische Widerstände, etc.). Diese befindet sich unter anderem in Steuergeräten und enthält Kupfer (Cu) und viele Arten von Seltenen Technologie Metalle (STM), beispielsweise Silber (Ag), Gold (Au), Palladium (Pd), Ruthenium (Ru).

**Komponente**

Kabel und Steckverbinder

Beschreibung

Kabel und Steckverbinder dienen beispielsweise dazu, eine Verbindung zwischen zwei Leiterplatten herzustellen, um Energie oder Information zu transportieren. Diese Komponente umfasst kleine Elektronik und enthält Cu, sowie einige STM (Au, Ag, etc.).



Komponente**Motor****Beschreibung**

Ein Motor ist eine Maschine, die aus elektrischer Energie Bewegung erzeugt. Der Aufbau besteht aus einer Stahl- oder Eisenstruktur (Stator und Rotor), welche sich in einem metallischen Gehäuse befindet, und Kupferwicklungen. Ein Motor enthält auch meistens ferrit- oder Neodym-reiche Magnete. Motoren sind Teil von Aktuatoren. In diesem Projekt werden sie als sogenannte Super-Bestandteile bezeichnet, da sie als Bestandteiletyp in anderen Geräten eingebaut sind, aber weitere Bestandteiltypen (Fe-Teile, Cu-Teile, Magnete) enthalten. Motoren als Bestandteile müssen unterschieden werden von elektrischen Antriebsmotoren, welche als eigener Gerätetyp gelten. Alle Motoren dieses Bestandteiletyps funktionieren nach ähnlichen Prinzipien und enthalten ähnliche Elemente in ähnlichen Verhältnissen, aber in sehr verschiedenen Massen (von einigen Gramm bis zu mehreren Kilogramm).

**Komponente****Bildschirm****Beschreibung**

Eine elektrisch angesteuerte Anzeige ohne bewegliche Teile zur optischen Signalisierung von veränderlichen Informationen wie Bildern oder Zeichen. In diesem Projekt wurden Bildschirme als Ganzes als Komponente eines Geräts behandelt. Sie sind oftmals in Steuergeräten enthalten. Typische Elemente und Teile eines Bildschirms sind Kunststofffolie, LED-Lichter, Aluminiumrahmung, etc.



Komponente

Fe-Teile

Beschreibung

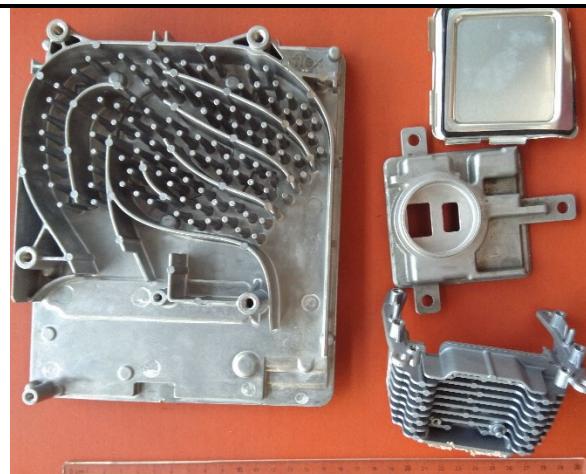
Eisen (Fe) als Element besitzt die Eigenschaften breite Verfügbarkeit (die es zu einem preiswerten Rohstoff macht) sowie Zähigkeit und Festigkeit von Eisenlegierungen. Es wird in der Regel nicht reines Fe verwendet, sondern Stahl oder Legierungen (z.B. Edelstahl), um gewisse Eigenschaften zu verbessern oder die Langlebigkeit zu erhöhen. Die Komponente Fe-Teile enthält deshalb oft neben Fe noch andere Elemente, beispielsweise Chrom (Cr), Nickel (Ni), etc. Fe kommt zum Einsatz in Gehäusen, Strukturen, Schrauben, etc. und ist Bestandteil von beinahe allen Geräten. Es zählt zu den ferromagnetischen Metallen und kann deshalb grosstechnisch eingesetzt werden bei Elektromotoren, Transformatoren und Generatoren.

**Komponente**

Al-Teile

Beschreibung

Aluminium (Al) als Element ist ein guter Leiter für Wärme und elektrischen Strom. Al-Teile enthalten oft auch andere Elemente in Form von Legierungsmitteln (Cu, Mg, Mangan (Mn), Silikon (Si), Zinn (Sn), Zink (Zn)) oder Unreinheiten (vor allem bei gegossenen Al-Teilen). Es wird häufig eingesetzt bei Radiatoren, Gehäusen, Elektrizitätsübertragungen, strukturellen Elementen, etc. von unterschiedlichen Gerätetypen, in gegossener oder geschmiedeter Form.

**Komponente**

Cu-Teile

Beschreibung

Cu-Teile enthalten vor allem Cu; ein rotbraunes, dehnbares Metall. Es ist gut schmiedbar. Nach Silber weist es die beste elektrische Leitfähigkeit auf und hat auch ein sehr gutes Wärmeleitvermögen. Deshalb wird in allen möglichen Kabeltypen verwendet. Elektrischen Leiter, die das Material nutzen, bestehen zu beinahe 100% aus Cu. Für andere Verwendungszwecke können auch Legierungsmittel enthalten sein neben dem Cu. Kommt in bedeutenden Mengen in elektrischen Motoren vor.



Komponente

Licht/LED

Beschreibung

Bei Glühbirnen wird ein Wolframdraht durch Zufuhr von Elektrizität erhitzt. Als Nebenprodukt der Wärme wird Licht abgegeben. Bei LED-Laternen wird Strom durch einen kristallinen Halbleiter geleitet, der dann Licht emittiert. LED-Lichter sind energieeffizienteren Leuchtmittel. Xenon-Glühbirnen in Frontscheinwerfern können Quecksilber enthalten, welches umweltbelastend und giftig ist.

**Komponente**

Kunststoff-Teile

Beschreibung

Festkörper, deren Grundbestandteil synthetisch oder halbsynthetisch erzeugte Polymere mit organischen Gruppen sind. Herausragendes Merkmal von Kunststoffen ist, dass sich ihre technischen Eigenschaften durch die Auswahl von Ausgangsmaterial, Herstellungsverfahren und Beimischung von Additiven in weiten Grenzen variieren lassen. Können Flammenschutzmittel enthalten (solche wurden jedoch während der Arbeit am vorliegenden Projekt kein identifiziert). Durch die weitverbreitete Nutzung wurde eine grosse Anzahl verschiedener Kunststoffsorten identifiziert während des Projekts. Die häufigsten darunter sind ABS, PC/ABS, PMMA, PC und PBT. Kunststoffe können transparent sein (z.B. PMMA).

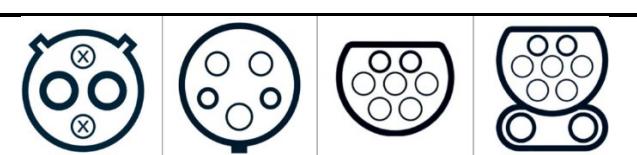
**Komponente**

Magnet

Beschreibung

Generell unterscheidet man zwei Arten von Magneten: Ferrit-Magnete (matte Oberfläche, enthalten keine seltenen Erden) und Neodym-Magnete (glänzende Legierung), enthalten Nd, Dy, Pr, La, Co. Neodym-Magnete sind sehr viel stärker als Ferrit-Magnete. Diese Unterscheidung wird im vorliegenden Projekt nicht berücksichtigt für Motoren als Bestandteile. Magnete werden ausschliesslich in Motoren und Lautsprechern verwendet.



<p>Komponente Andere Metalle</p> <p>Beschreibung z.B. Zinn, Messing, Blech, Magnesium-Legierungen, Blei. In diese Komponente fallen alle Metalle oder Metalllegierungen, die zu keiner der anderen Kategorien gehören.</p>	
<p>Komponente Elektrisches Kabel</p> <p>Beschreibung Elektrische Kabel können in einer Vielzahl von Gerätetypen enthalten sein, z.B. in Batterieladegeräten oder Ähnlichem. Enthalten vor allem Kupfer oder Kupferlegierungen, sowie Kunststoffe. Der Unterschied zur Kategorie der Kabel und Steckverbindungen besteht im Durchmesser der Kabel. Elektrische Kabel weisen einen Durchmesser von ca. 1 cm auf.</p>	
<p>Komponente Stecker zu elektrischem Kabel</p> <p>Beschreibung Verschiedene Steckertypen (Bild: von links nach rechts): CHAdeMO-Stecker, Typ 1-Stecker, Typ 2-Stecker, Combo-Stecker. Enthalten vor allem Kupfer und Kupferlegierungen. Können manchmal andere Metalle enthalten für die Steckverbindungen, sowie Kunststoffe oder aber auch Eisen für die strukturellen Bestandteile.</p>	 <p>Quelle: Die wichtigsten Ladekabel- und Steckertypen für Elektroautos – Magazin für Elektromobilität (energieloesung.de)</p> 

Komponente

Rest

Beschreibung

z.B. Gummi, Schaumstoff, Silikonteile, etc.
Sämtliche Materialien, welche keiner der oben
genannten Kategorien entsprechen.



Anhang C Parameter aus dem Materialverwertungsmodul

Tabelle 17: Anteil der gesamten Recyclinginputmasse die jeden Behandlungs- und Transportprozess durchläuft, pro Gerätekategorie und Szenario

Prozess Beschreibung	ID	Massenanteile für "Baseline"				Massenanteile für "EEG Ausbau"			
		Schein- werfer	Aktua- toren	Control- ler	Kabel	Schein- werfer	Aktua- toren	Control- ler	Kabel
Dismantling from car	5	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_1	1.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Manual Dismantling	17	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_2	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_3	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Mechanical treatment	18	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_9	9.7E-02	6.4E-02	1.4E-01	0.0E+00	9.7E-02	6.4E-02	1.4E-01	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_4	1.7E-03	3.6E-02	3.2E-02	0.0E+00	1.7E-03	3.6E-02	3.2E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_5	2.8E-02	6.1E-02	8.0E-02	0.0E+00	2.8E-02	6.1E-02	8.0E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_6	3.4E-02	1.1E-01	5.9E-02	0.0E+00	3.4E-02	1.1E-01	5.9E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_18	6.9E-02	1.5E-01	1.6E-01	0.0E+00	6.9E-02	1.5E-01	1.6E-01	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_13	5.2E-02	1.9E-01	3.2E-01	0.0E+00	5.2E-02	1.9E-01	3.2E-01	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_7	7.1E-01	3.7E-01	1.9E-01	4.9E-01	7.1E-01	3.7E-01	1.9E-01	4.9E-01
Transport by Truck EURO5	T_8	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	5.0E-01	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	5.0E-01
Metal Separation A (Fe, Cu and PM)	23	1.7E-03	3.6E-02	3.2E-02	0.0E+00	1.7E-03	3.6E-02	3.2E-02	0.0E+00
Metal Separation A (Fe, Cu and PM)	23	2.8E-02	6.1E-02	8.0E-02	0.0E+00	2.8E-02	6.1E-02	8.0E-02	0.0E+00
Metal Separation B (Al, Cu and PM)	24	3.4E-02	1.1E-01	5.9E-02	0.0E+00	3.4E-02	1.1E-01	5.9E-02	0.0E+00
Metal/Plastics Separation	25	6.9E-02	1.5E-01	1.6E-01	0.0E+00	6.9E-02	1.5E-01	1.6E-01	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_15	2.6E-04	5.3E-03	4.9E-03	0.0E+00	2.6E-04	5.3E-03	4.9E-03	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_10	1.1E-03	2.2E-02	2.0E-02	0.0E+00	1.1E-03	2.2E-02	2.0E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_16	1.6E-03	3.5E-03	4.6E-03	0.0E+00	1.6E-03	3.5E-03	4.6E-03	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_11	2.1E-02	4.5E-02	6.0E-02	0.0E+00	2.1E-02	4.5E-02	6.0E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_17	1.4E-03	4.5E-03	2.4E-03	0.0E+00	1.4E-03	4.5E-03	2.4E-03	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_12	2.1E-02	7.2E-02	3.7E-02	0.0E+00	2.1E-02	7.2E-02	3.7E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_19	6.4E-02	3.4E-02	2.0E-02	0.0E+00	6.4E-02	3.4E-02	2.0E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_14	4.7E-01	1.4E-01	7.4E-02	0.0E+00	4.7E-01	1.4E-01	7.4E-02	0.0E+00
Integrated copper smelter	26.1	5.0E-02	2.1E-02	2.7E-02	3.8E-01	3.2E-03	1.3E-02	1.2E-02	3.8E-01
Integrated copper smelter Precious metals	26.2	2.0E-05	5.0E-06	3.6E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Integrated copper smelter Precious metals	26.3	1.2E-04	3.8E-05	7.8E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Integrated copper smelter Precious metals	26.4	4.1E-06	5.9E-07	5.5E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Aluminium smelter	27	8.3E-02	2.0E-01	1.8E-01	0.0E+00	8.3E-02	2.0E-01	1.8E-01	0.0E+00
Iron smelter	28	7.2E-02	2.5E-01	3.9E-01	0.0E+00	7.2E-02	2.5E-01	3.9E-01	0.0E+00
Plastic recycler	29	4.7E-01	1.4E-01	7.4E-02	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Incineration	30	2.0E-01	2.6E-01	3.2E-01	6.3E-01	8.4E-01	5.3E-01	4.2E-01	6.3E-01

Tabelle 18: Anteil der gesamten Recycling-Input-Masse, die verwertet werden kann, pro Material/Element für jede Gerätekategorie und jedes Szenario.

Szenario	Gerätekategorie	Zurückgewonnene Massenanteile pro Material/Element										
		Fe	Al	Cu	Au	Ag	Pd	PP	PMMA	ABS	PC/ABS	Verluste
Szenario "Baseline" ⁹	Scheinwerfer	0.072	0.083	0.003	0	0	0	0	0	0	0	0.842
	Aktuatoren	0.252	0.202	0.013	0	0	0	0	0	0	0	0.533
	Steuergeräte	0.388	0.181	0.012	0	0	0	0	0	0	0	0.419
	Kabel	0	0	0.375	0	0	0	0	0	0	0	0.625
Szenario "EEG Ausbau"	Scheinwerfer	0.072	0.083	0.050	2E-05	1E-04	4E-06	0.018	0.201	0.133	0.122	0.321
	Aktuatoren	0.252	0.202	0.021	5E-06	4E-05	6E-07	0.010	0.000	0.071	0.065	0.380
	Steuergeräte	0.388	0.181	0.027	4E-05	8E-05	5E-06	0.005	0.000	0.036	0.033	0.330
	Kabel	0.000	0.000	0.375	0E+00	0E+00	0E+00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.625
Unterschied zwi- schen "EEG Ausbau" und "Baseline"	Scheinwerfer	0	0	0.047	2E-05	1E-04	4E-06	0.018	0.201	0.133	0.122	-0.521
	Aktuatoren	0	0	0.008	5E-06	4E-05	6E-07	0.010	0	0.071	0.065	-0.153
	Steuergeräte	0	0	0.015	4E-05	8E-05	5E-06	0.005	0	0.036	0.033	-0.089
	Kabel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

⁹ Zur Abschätzung der Mengen an Stoffen und Elementen, die in einem Grossschredder aus dem EEG zurückgewonnen werden (Szenario "Baseline"), wurde davon ausgegangen, dass der Behandlungsprozess ähnlich wie in einer E-Schrott-Recyclinganlage abläuft, jedoch ohne die Produktion der Fraktionen "Leiterplatten" und "Kunststoffe", deren Stoffe in den RESH gelangen. Da das RESH anschließend verbrannt wird, gehen die darin enthaltenen Elemente und Stoffe verloren.

