

Wirtschaftsmodul

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

AutorInnen

Charles Marmy¹

Manuele Capelli¹

Heinz Böni¹

Titelbild: ©C. Marmy, 2022

Hinweis

Diese Studie wurde mit finanzieller Unterstützung von der Stiftung Autorecycling Schweiz (SARS) durchgeführt. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich. Die Autoren bedanken sich herzlich bei Thomas Ramseyer (SARS) sowie Dennis Lackovic und Roger Gnos vom Verband der ICT und Online-Branche (Swico) für ihre wertvollen Kommentare und Ratschläge.

St. Gallen, Januar 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Kontext	1
1.2	Eingebettete elektronische Geräte und ihre Klassifizierung	2
1.3	Seltene Technologiemetalle	5
1.4	Ziel des Projekts EVA II	6
1.5	Das Gesamtmodell	7
1.6	Ziel des Wirtschaftsmoduls	11
2	Methodik	12
2.1	Ansatz	12
2.2	Modulelemente	14
2.3	Mathematische Modellierung	14
2.4	Grenzen des Wirtschaftsmoduls	20
3	Ergebnisse	22
3.1	Exogene Parameter und Sensitivitätsanalyse	22
3.2	Kosten des Ausbaus und separaten Recycling	22
3.3	Mögliche Weiterentwicklungen	26
4	Schlussfolgerungen	27
5	Referenzen	28
Anhang A	Liste der identifizierten Gerätetypen	32
Anhang B	Liste der EEG Bestandteile	42
Anhang C	Wichtige Parameter des Wirtschaftsmoduls	49

Tabellen

Tabelle 1:	Gerätekatogorien, ihrer typischen Bestandteile und Zusammensetzungen.....	4
Tabelle 2:	Auswahl relevanter STM in Fahrzeugen und deren typischen Anwendungen.....	5
Tabelle 3:	Liste der Berichte zum Projekt EVA II	7
Tabelle 4:	Notation für Grössen und Modellvariablen.....	15
Tabelle 5:	Notation für Aspekte und Dimensionen.	15
Tabelle 6:	Notation für Entitäten und Modellebenen	15
Tabelle 7:	Parameter des Wirtschaftsmoduls und ihre Datenquellen.....	17
Tabelle 8:	Modellgleichungen des Wirtschaftsmoduls	19
Tabelle 9:	Werte der exogenen Parameter.....	22
Tabelle 10:	Sensitivität der Kostenfaktoren am Beispiel Steuergerät: Infotainment.....	22
Tabelle 11:	Gesamtkosten und Gesamtmasse der EEG jeder Gerätekategorie pro Altfahrzeug.....	23
Tabelle 14:	Wichtige Parameter und Inputdaten.....	50
Tabelle 15:	Hauptergebnisse des Gesamtmodells	53

Abbildungen

Abbildung 1:	Illustrierung der Nomenklatur zur Kategorisierung der EEG im Rahmen des Projekts EVA II.	3
Abbildung 2:	Konzeptuelle Architektur des Gesamtmodells (EVA II)	8
Abbildung 3:	Übersicht über das modellierte schweizerische Altfahrzeugverwertungssystem	10
Abbildung 4:	Systemgrenzen des Wirtschaftsmoduls im Rahmen des gesamten Systems	13
Abbildung 5:	Struktur der für physikalische Grössen in der mathematischen Modellierung verwendeten Notation.	16
Abbildung 6:	Gesamtkosten der EEG jeder Gerätekategorie pro durchschnittlichen Altfahrzeug. Die Erlöse aus dem Recycling werden ausschliesslich den Recyclingbetrieben zugerechnet. Somit kann ein Teil der Recyclingkosten kompensiert werden. Die Recyclingkosten in der Abbildung stellen die verbleibenden Kosten nach Abzug der Erlöse dar.....	24
Abbildung 7:	Gesamtkosten für die Gesamtmasse jedes Gerätetyps pro Altfahrzeug (Referenzjahr 2021)	25

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 EEG 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 üben 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 "Geräte-kategorie" und "Gerätetyp" sind im Kapitel 1.2 genau definiert.
Geräte-kategorie	Eine Kategorie bestehend aus verschiedenen Gerätetypen, welche eine ähnliche Zusammensetzung und Verhalten in der mechanischen Behandlung zeigen. Die Konzepte "Geräte-kategorie" 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 Platin 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 recycelt, 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), welche gemeinsam mit den Siedlungsabfällen verbrannt wird. Dabei geht der grösste Teil der enthaltenen STM verloren.

Das im Rahmen des Projekts EVA II entwickelte Wirtschaftsmodul analysiert die Kosten eines Szenarios "EEG Ausbau", welches den Ausbau der EEG aus Fahrzeugen mit der separaten Behandlung in das existierende System des Elektronikschrottrecyclings integriert. Das Wirtschaftsmodul dient dazu, die zusätzlichen Kosten für jeden Gerätetyp zu bestimmen und untereinander zu vergleichen. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich für jeden Gerätetyp beurteilen, ob Ausbau und separates Recycling wirtschaftlich tragbar sind.

Für die Modellierung der Kosten des Ausbaus sowie des separaten Recyclings der EEG wurden drei Hauptkostenfaktoren definiert: Ausbau von EEG aus Altfahrzeugen, Logistik, sowie Recycling. Für die Bestimmung der Kostenfaktoren wurden Daten aus früheren Studien, aus der wissenschaftlichen Literatur sowie aus Expertenbefragungen verwendet. Insbesondere wurden für jeden Gerätetyp Parameter wie die Ausbauzeit und der Anteil der ausgebauten Geräte, die als Ersatzteile verkauft werden, ermittelt. Die Kosten wurden für ein durchschnittliches in der Schweiz recyceltes Auto berechnet, wobei berücksichtigt wurde, dass Geräte, die zum Verkauf als Ersatzteile ausgebaut werden, keine zusätzlichen Kosten verursachen. Bei den Modellierungen wurden die Kosten des Ausbaus von EEG sowie deren Logistik ermittelt. Für die Modellierung des Recyclings wurden sowohl die Kosten als auch die Erlöse aus dem Verkauf von Ersatzteilen berücksichtigt. Deshalb lassen sich die drei Kostenblöcke Ausbau, Logistik und Recycling nicht direkt miteinander vergleichen.

Falls man unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Voraussetzungen trotzdem einen Vergleich zieht, machen die Ausbaukosten der EEG den grössten Anteil der Gesamtkosten aus. Die Kosten des Ausbaus und separaten EEG Recyclings, inklusive Erlöse aus dem Recycling, betragen unter 10 CHF pro Gerätetyp und Fahrzeug. Pro Altfahrzeug bedeutet dies Kosten von ca. 190 CHF. Dies entspricht ungefähr 0.5% des durchschnittlichen Verkaufspreises eines Neuwagens.

1 Einleitung

1.1 Kontext

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 grösstenteils aus Industriemetallen (Eisen, Aluminium und Kupfer). Sie enthalten aber auch viele Seltene Technologiemetalle (STM) wie Edelmetalle (wie Gold, Silber, oder Platin 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 Altfahrzeugen pro Jahr, wird das signifikante Rückgewinnungspotenzial der STM aus Fahrzeugen deutlich.

Ein Grossteil der EEG wird heute nicht entfernt und separat recycelt, 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 seltenen Technologiemetalle konzentrieren sich nach dieser mechanischen Behandlung in der Schredderleichtfraktion (RESH) auf, welche gemeinsam mit den Siedlungsabfällen 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 recycelt werden müssen, sofern deren Ausbau mit verhältnismässigem Aufwand möglich und deren stoffliche Verwertung nach dem Stand der Technik sinnvoll ist. Das UVEK wird den Geltungsbereich in einer departementalen 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 Bestandteilen enthaltenen verwertbaren Stoffe zurückgewonnen werden, soweit dies **technisch möglich, wirtschaftlich tragbar und ökologisch sinnvoll ist***

Art. 2 Gegenstand und Geltungsbereich

(...)

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 Ergebnisse in Bezug auf die stoffliche Verwertung von Metallen erbringt [2].

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 stoffliche Verwertung nach dem Stand der Technik sinnvoll ist.

(...)

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.

1.2 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-130DAB - Autoradio	 *Steuergerät Infotainment (Sound-, Navi-, und Multimedia)*	 „Steuergerät“	 4 x *Scheinwerfer (vorne und hinten)* 4 x 2223 g = 8892 g pro Fhz ?
 7021A-16G 7 inch 2 DIN Android Car MP5 Player Stereo Car Radio Car Multimedia Player Support GPS Navigation	 *Scheinwerfer (vorne und hinten)*	 „Scheinwerfer“	
 Hauptscheinwerfer ABAKUS 212-11K2L-LD-EM  Heckleuchte ABAKUS 215-19K6L-LD-UE			

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 Klimaautomatik.
- Die Kategorie "**Aktuator**" umfasst Geräte, welche mit Hilfe von Bestandteile wie kleine 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 "**Scheinwerfer**", die nur den Gerätetyp "Front- und Rückscheinwerfer" enthält

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

Tabelle 1: Gerätekategorien und ihrer typischen Bestandteile und Zusammensetzungen

Gerätekategorie	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.

Gerätekategorien 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

1.3 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 unersetzlich und sie sind oft von hohem strategischem Wert. 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 im Prinzip vor.

Bei den Seltenerdmetallen wie Neodym oder Dysprosium ist der Recyclinganteil in neuen Anwendungen geringer als 1 Prozent. Dies, obwohl die Versorgungssicherheit dieser Metalle aus Primärproduktion in Zukunft nicht gegeben ist und diese Metalle 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)	Metalllegierungen, 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

1.4 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 Bestandteilen in Fahrzeugen der Ausbau verhältnismässig und die stoffliche Verwertung nach dem Stand der Technik sinnvoll ist. 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).
- 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.
- C. Bestimmung der aktuellen Leistung des Schweizer Altfahrzeug-Recyclingsystems in Bezug auf Verluste und Rückgewinnung von STM und anderer Wertstoffe in EEG.

Als Grundlage aller Arbeiten von EVA II wurden verschiedene Berichte erstellt (Übersicht inklusive der Zuordnung der Berichte zu der präsentierten Aufgaben A, B und C, siehe Tabelle 3). Die. Für die detaillierten Resultate wird auf die entsprechenden Berichte verwiesen.

Tabelle 3: Liste der Berichte zum Projekt EVA II

ID	Titel des Berichts	Aufgabe	Inhalt
B1	Dynamisches Stoffflussmodul [8]	A, B, C	Beschreibung des dMFA-Moduls des Gesamtmodells mit illustrativen Ergebnissen der Fahrzeug-, Geräte- und Elementemassenströme in der Schweiz.
B2	Materialverwertungsmodul [9]	C	Beschreibung des Moduls zur Materialrückgewinnung mit den Ergebnissen der zurückgewonnenen Materialien für jede Gerätekategorie und jeden Gerätetyp.
B3	Wirtschaftsmodul [10]	A	Beschreibung des Wirtschaftsmoduls mit den Ergebnissen der Kosten des Ausbaus und separatem Recycling für jeden Gerätetyp.
B4	Ökobilanzmodul [11]	A	Beschreibung des Ökobilanzmoduls mit den Ergebnissen der Umweltbilanz des Ausbaus und separatem Recycling für jeden Gerätetyp.
B5	Versuche und Datenbeschaffung [12]	A, C	Beschreibung der Methodik und der Ergebnisse aller durchgeführten Experimente und Datenerfassungsaktivitäten sowie Beschreibung der Struktur der Datenbank mit allen benötigten Ergebnissen und Daten im Rahmen von EVA II.
B6	Zukünftige Materialflüsse in der Fahrzeugflotte [13]	B	Beschreibung der mit der Arbeitsgruppe entwickelten Flottenentwicklungsszenarien und Diskussion ihrer Auswirkungen auf die Materialströme im Schweizer Autorecyclingsystem.
B7	Synthesebericht [14]	A, B, C	Überblick auf die übergeordneten Ziele des Projekts EVA II und Zusammenfassung der wichtigsten im Rahmen des Projekts erarbeiteten Ergebnisse.

1.5 Das Gesamtmodell

Die im Kapitel 1.5 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 [15].
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 [11].
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 [10].

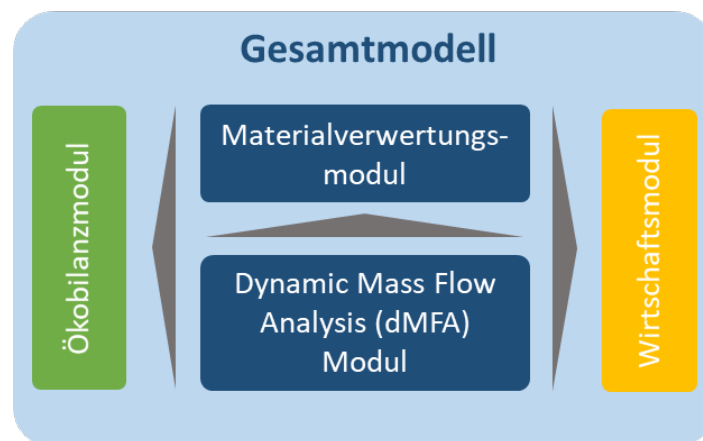


Abbildung 2: Konzeptuelle Architektur des Gesamtmodells (EVA II)

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 Fahrzeuglebensdauer 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) 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 Ausgangsfraktionen 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 eingeteilt, 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.

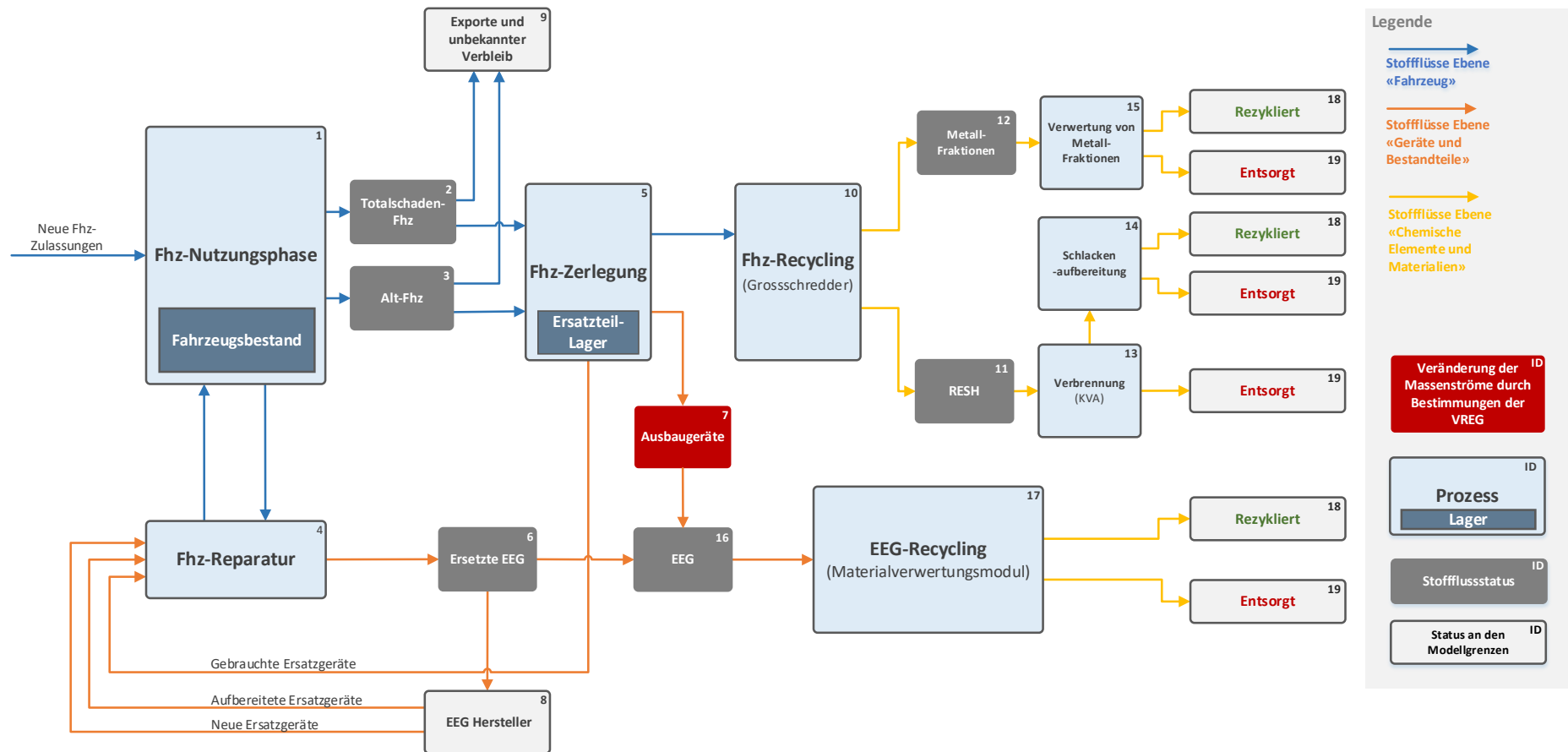


Abbildung 3: Übersicht über das modellierte schweizerische Altfahrzeugverwertungssystem

1.6 Ziel des Wirtschaftsmoduls

Im heutigen Entsorgungssystem werden Altfahrzeuge von Autoverwertern gekauft. In bestimmten Fällen werden EEG ausgebaut und als gebrauchte Ersatzteile für die Reparatur verkauft. Altfahrzeuge werden im gleichen Schritt gemäss den gesetzlichen Bestimmungen trockengelegt [16]. Dies beinhaltet das Entfernen von gefährlichen Flüssigkeiten wie Restbenzin und Öl sowie das Abmontieren der Reifen und der Ausbau der Batterie.

Die Altfahrzeuge mit den restlichen EEG werden in einem weiteren Schritt an Recyclingunternehmen (Grossschredder) weiterverkauft. Sie werden von den Recyclingunternehmen im Grossschredder mechanisch zur Rückgewinnung von Industriemetallen (Fe, Al, Cu) behandelt.

Das typische Geschäftsmodell eines AutoverwerTERS beinhaltet zwei Erlöse:

- Den Verkauf von trockengelegten Fahrzeugen an Recyclingunternehmen
- Den Verkauf von gebrauchten EEG als Ersatzteile an Fahrzeuggaragen.

Die Kosten beinhalten den Aufwand der Trockenlegung, den Ausbau der EEG wie auch die Entsorgung der Abfälle.

Ziel des Wirtschaftsmoduls ist die Bestimmung der Kosten des Ausbaus und des anschliessenden Recyclings für jeden Gerätetyp in auf Elektroschrott spezialisierten Anlagen. Als Vergleich dient die heutige Situation, bei der die EEG im Fahrzeug verbleiben und im Grossschredder behandelt werden.

2 Methodik

2.1 Ansatz

Das Wirtschaftsmodul beinhaltet den Ausbau der EEG, den Transport sowie das Recycling. Es werden die Kosten des Ausbaus für alle in EVA II identifizierten Gerätetypen bestimmt. Die so ermittelten Kosten werden als Indikator für die Beurteilung der wirtschaftlichen Tragbarkeit des Ausbaus verwendet.

Abbildung 4 zeigt die Abgrenzung des Wirtschaftsmoduls innerhalb des gesamten Systems: Nicht alle Prozesse sind für die Berechnung der Kosten der Pflichtausbau sowie des zusätzlichen Transports und des Recyclingaufwands relevant (siehe Abbildung 5). Im Gegensatz zur dMFA werden im Wirtschaftsmodul nicht die Massen der Flüsse betrachtet, sondern die ökonomischen Flüsse, d.h. die anfallenden Kosten sowie Erlöse, im Falle einen Pflichtausbau von bestimmten EEG.

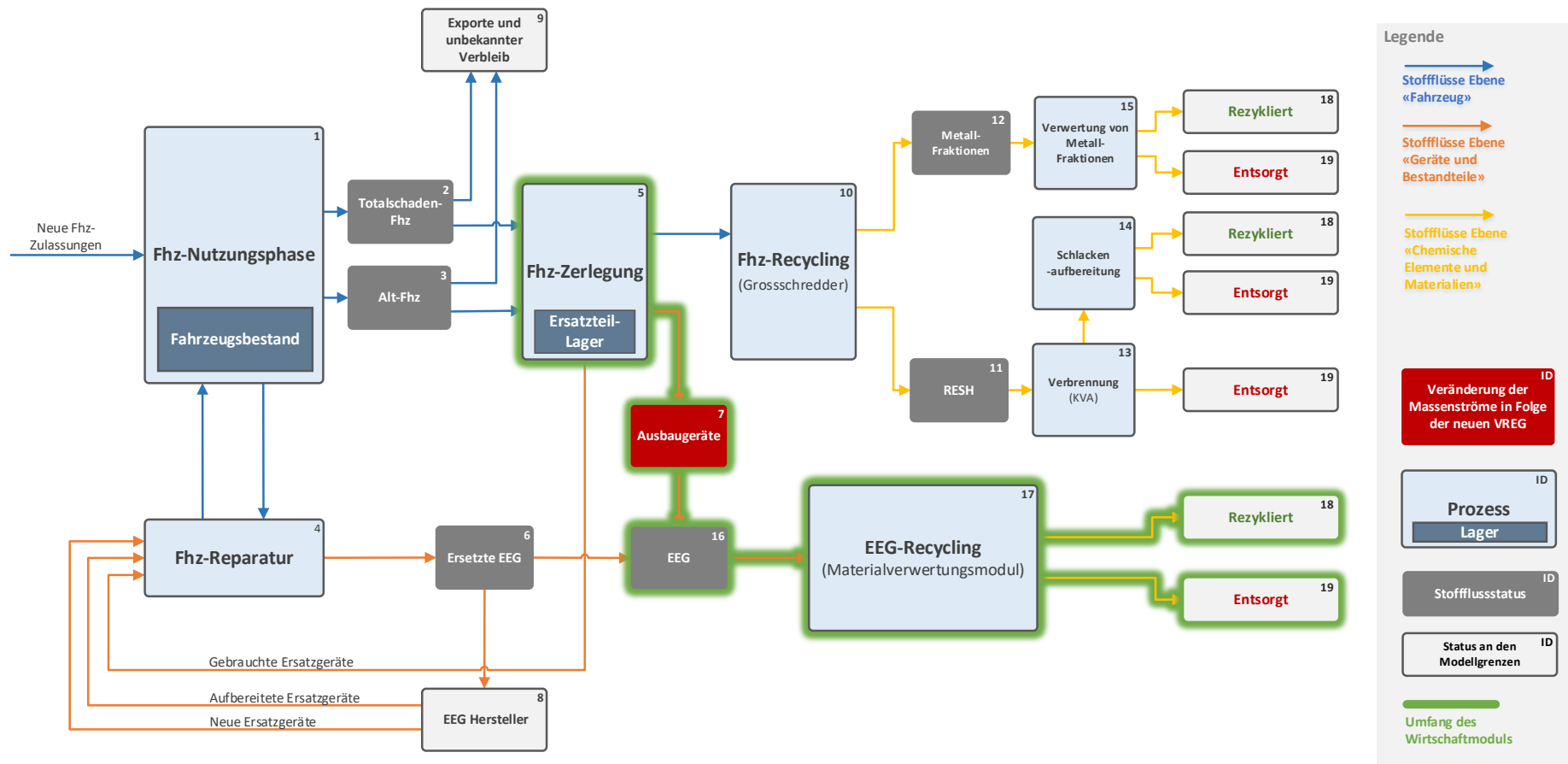


Abbildung 4: Systemgrenzen des Wirtschaftsmoduls im Rahmen des gesamten Systems

2.2 Modulelemente

Im Wirtschaftsmodul wurden 3 Kostenfaktoren identifiziert sowie modelliert:

- **Ausbau von EEG aus Altfahrzeugen:** Es wird angenommen, dass der Ausbau der EEG gleichzeitig mit der Trockenlegung des Fahrzeugs stattfindet. Für die Ermittlung der Kosten des Ausbaus sind Daten zum Arbeitsaufwand und die durchschnittlichen Gerätemassen für die 43 identifizierten EEG Gerätetypen notwendig. Die Daten stammen aus verschiedenen Quellen: Aus Experimenten im Rahmen von EVA II, früheren Projekten, wissenschaftlicher Literatur, Interviews mit Experten sowie Schätzungen.
- **Logistik:** Nachdem die EEG aus den Autos entfernt sind, werden sie zu einer Elektroschrott-Recyclinganlage transportiert. Um die Kosten der Logistik zu bestimmen, wurden die Preisangaben für die Dienstleistungen und die von den Logistikunternehmen bzw. den Autoverwertern erhaltenen Informationen berücksichtigt.
- **Recycling:** In der Recyclinganlage werden die EEG rezykliert, um sekundäre Rohstoffe zu gewinnen. Um die Kosten dieses Schrittes zu bestimmen, lehnt sich das Modell an das Finanzierungssystem von SWICO an, da die Behandlungsprozesse von EEG identisch zu Geräten der Unterhaltungselektronik sind und der Wert der Outputfraktionen in etwa der im SWICO-System verwendeten "IT UE Rest" Kategorie entspricht. Die finanzielle Entschädigung, die den Recyclern für die Behandlung von SWICO-Geräten gewährt wird, berücksichtigt den ökonomischen Wert der Fraktionen, indem diese an den Gehalt der Basismetalle Kupfer, Eisen und Aluminium und deren internationalen Handelspreise gekoppelt werden. Die Bruttokosten des Recyclings werden in diesem Modul nicht berechnet.

Bei den Modellierungen wurden die Kosten des Ausbaus von EEG sowie deren Logistik ermittelt. Für die Modellierung des Recyclings wurden sowohl die Kosten als auch die Erlöse aus dem Verkauf von Ersatzteilen berücksichtigt. Deshalb lassen sich die drei Kostenblöcke Ausbau, Logistik und Recycling nicht direkt miteinander vergleichen.

Mit den Kostenfaktoren können die Ausbau- und Recyclingkosten der EEG pro Fahrzeug für jeden Gerätetyp ermittelt werden. Mit Hilfe des dMFA Moduls können die gesamten Ausbau- und Recyclingkosten der EEG ermittelt werden, indem die Kosten pro Fahrzeug auf alle in der Schweiz behandelten Altfahrzeuge im Referenzjahr 2021 angewendet werden. Dies ermöglicht eine Abschätzung der Kosten für das Szenario "EEG Ausbau".

2.3 Mathematische Modellierung

2.3.1 Notationen

Die folgenden Notationen werden verwendet, um verschiedene Arten von Grössen (physikalisch oder ökonomisch) und Variablen im Modul zu bezeichnen.

Tabelle 4: Notation für Grössen und Modellvariablen.

Symbol	Grösse	Einheit
N	Anzahl (Fahrzeuge oder EEG) in einem Stofffluss oder dem Bestand	1/Jahr oder 1
M	Massenstrom oder Massenbestand	kg/Jahr oder kg
C	Kosten oder Geldstrom	CHF oder CHF/Jahr
T	Zeit	min
D	Strecke	km
B	boolesche Variable	{JA oder NEIN},
m	Durchschnittliche Masse eines Objekts (z.B. Fahrzeug oder EEG)	kg
w	Massenanteil	kg/kg
n	Anteil von einer Anzahl (z.B. Anzahl eines bestimmten EEG pro Fahrzeug)	1
u_y	Kosten pro Einheit y	CHF/y
k_{h-i-j}	Transferkoeffizient: Anteil des Geld- oder Massenstroms von Prozess h zu Prozess i , der zu Prozess j geht	1
r	Ausfallrate: Anteil der Fahrzeuge oder Geräte der während eines Jahres aus dem Bestand fließt	1

Tabelle 5: Notation für Aspekte und Dimensionen.

Symbol	Aspekt oder Dimension	Mögliche Werte
i, j	Prozess	{0, ..., 20}
t	Zeit	{1950, ..., 2060}
c	Jahrgang	{1950, ..., 2060}
a	Alter; $a \equiv t - c$	{0, ..., 110}
v	Fahrzeugtyp (nach Antrieb)	Benzin, Diesel, Benzin-Hybrid (HEV), Benzin Plug-in-Hybrid (PHEV), Diesel Hybrid (HEV), Diesel Plug-in-Hybrid (PHEV), Elektroantrieb, andere
d	Gerätetyp	Siehe Geräteliste im Anhang A
l	Auswahl (Liste) von n Gerätetypen	n Gerätetypen $\{d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n\}$
p	Bauteil- oder Materialtyp	siehe ANHANG B
e	Element	Fe, Al, Cu, Au, Ag, Pd, Nd, Dy, Pr, Pt, Rh
s	Stufe des Recyclings	{ α = Ausbau der EEG; β =Logistik; γ =Shreddern und Trennung}
y	Referenzgrösse für Kosten pro Einheit	Wobei $y = \{\text{Einheit Zeit (T), Einheit Masse (M), Einheit Distanz (D), oder Einheit Masse \& Distanz (DM), Anzahl Fahrzeuge oder Geräte (N)}\}$

Tabelle 6 beschreibt die unterschiedlichen Ebenen der Rechenschritte in der Modellierung: Modellebene Fahrzeug oder tiefere Ebene. Siehe dazu auch Abbildung 5.

Tabelle 6: Notation für Entitäten und Modellebenen

Symbol	Entität	Beschreibung
veh	Fahrzeug	Ein Personenwagen inklusive aller enthaltenen Geräte. Beschreibt die Entität in der Modellebene bis zum Ausbau der Geräte.
dev	Gerät	Ein in Personenwagen enthaltenes eingebettetes elektronisches Gerät. Die Hauptentität in der Geräteebebene zwischen Ausbau und weiteren Auftrennung.

<i>par</i>	Bauteil	Ein Bauteil eines EEG, wie beispielsweise ein Elektromotor. Hauptentität in der Bauteilebene nach der Auftrennung in Fraktionen bis zum finalen Rückgewinnungsprozess.
<i>el</i>	Element	In Bauteilen enthaltene elementare Fraktion, wie beispielsweise Kupfer. Hauptentität beim finalen Rückgewinnungsprozess.

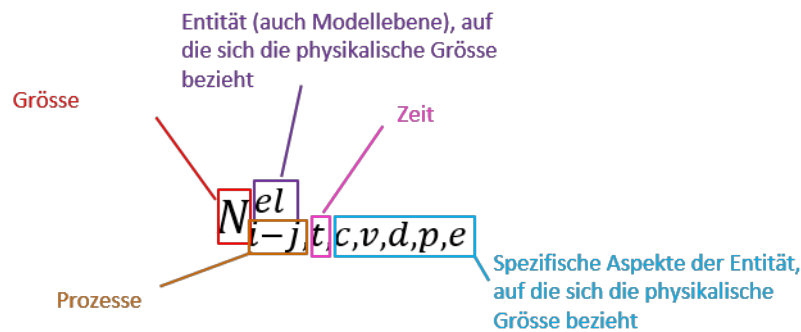


Abbildung 5: Struktur der für physikalische Grössen in der mathematischen Modellierung verwendeten Notation.

2.3.2 Definitionen der Inputparameter

Die für das Wirtschaftsmodul verwendeten Inputparameter sind in Tabelle 7 beschrieben. Es gibt zwei Arten von Inputparametern:

- **Endogene Parameter** stammen aus Ergebnissen des Gesamtmodells. Diese fliessen in das Wirtschaftsmodul ein. In einigen Fällen liefert das Gesamtmodell direkt Daten an das Wirtschaftsmodul, ohne diese zu verändern, wie zum Beispiel die Menge der exportierten Fahrzeuge der vergangenen Jahre (P2). Diese Konfiguration ermöglicht es, Daten aus alternativen Szenarien oder Prognosen, die für das Gesamtmodell ausgearbeitet wurden, direkt in das Wirtschaftsmodul einzubinden.
- **Exogene Parameter** werden ausschliesslich für das Wirtschaftsmodul benötigt, nicht aber für den Rest der Modellierung. Als solche werden sie speziell erfasst und direkt in das Modul integriert. Dabei handelt es sich zum Teil um Parameter, deren Werte im Berechnungstool für die Betrachtung verschiedener Szenarien verändert werden können, wie beispielsweise die Transportstrecke der ausgebauten EEG. Für jeden der veränderbaren Parameter wurde im Berechnungstool ein "Standard"-Wert definiert, der aufgrund des derzeitigen Wissensstands im Projekt als realistisch erachtet wird.

Tabelle 7: Parameter des Wirtschaftsmoduls und ihre Datenquellen

ID	Parameter	Notation	Einheit	Typ	Datenquelle
P1	Anzahl Neuzulassungen im Referenzjahr $t=ref$	$N_{0-1,t=ref}^{veh}$	1	Endogen	Die Daten für diese Parameter werden durch das dMFA Modul geliefert. Dabei können je nach Situation im dMFA verschiedene Quellen verwendet werden: <ul style="list-style-type: none"> - Für vergangene Zeitreihe sind Daten aus offiziellen Statistiken benutzt [17]–[24] - Für künftige Jahre werden die Daten durch Szenarien auf der Grundlage von Vorhersagen verschiedener Statistiken, wie z. B. Demografie, Autobesitz oder Marktzusammensetzung ermittelt und vom dMFA-Modul des Modells berechnet. Diese Szenarien werden im Rahmen von EVA II entwickelt [15], [24]–[28]. - Für alternativen Szenarien werden die Daten von Experten-Workshops im Rahmen von EVA II erstellt und mit dem dMFA-Modul des Modells berechnet [15], [28]
P2	Anzahl Exportierte Altfahrzeuge im Referenzjahr $t=ref$	$N_{x-9,t=ref}^{veh}$	1	Endogen	
P3	Anzahl Altfahrzeuge rezykliert im Referenzjahr $t=ref$	$N_{x-5,t=ref}^{veh}$	1	Endogen	
P4	Arbeitskosten pro Minute für die Ausbau von Geräte	$u_{T,5,\alpha}^{dev}$	CHF/min	Exogen	Die Daten dieser Parameter beruhen auf der Einschätzung durch Experten in der Fahrzeugverwertungsbranche. Die Zahl widerspiegelt den Stundensatz einer Fachperson einschließlich Werkzeug und Werkstattnutzung [29]
P5	Ausbauzeit in Minuten pro Gerät	$T_{5,\alpha,d}^{dev}$	min	Exogen	Die Daten dieser Parameter basieren auf Ergebnisse aus früheren Studien [30], [31]. Die Daten spiegeln die Zeit wider, die für den Ausbau von EEG-Typen aus einem Fahrzeug erforderlich ist. Die Experimente wurden jedoch mit dem Ziel durchgeführt, die Funktion der Geräte zu erhalten. Einen weniger behutsamen Ausbau könnte möglicherweise schneller durchgeführt werden.
P6	Einheitliche Gerätetransportkosten	$u_{DM,5-17,\beta}^{dev}$	CHF/kg*km	Exogen	Die Daten dieser Parameter basieren auf Einschätzungen durch Experten der Logistikbranche [32].
P7	Transportstrecke von Geräten zwischen Ausbau und Recycling	$D_{5-17,\beta}^{dev}$	km	Exogen	Dieser Parameter stellt die durchschnittliche Entfernung zwischen einem Zerlegebetrieb und der nächstgelegenen E-Schrott-Recyclinganlage dar. Die Daten für diesen Parameter basieren auf Interviews mit Experten aus diesem Bereich sowie auf Schätzungen, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden [29].
P8	Transportstrecke von Fahrzeugen zwischen Ausbau und Recycling	$D_{x-5,\beta}^{veh}$	km	Exogen	Dieser Parameter stellt die durchschnittliche Entfernung dar über welche Alt-Fhz bis zum Fahrzeugverwerter für den Ausbau der Geräte transportiert werden müssen. Die Daten für diesen Parameter basieren auf Interviews mit Experten aus diesem Bereich sowie auf Schätzungen, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden [29].

ID	Parameter	Notation	Einheit	Typ	Datenquelle
P9	Durchschnittliche Masse eines Geräts d	m_d	kg	Endogen	Die Daten für diesen Parameter werden dem Wirtschaftsmodul durch das Gesamtmodell (durch das dMFA-Modul) zur Verfügung gestellt. Das dMFA-Modul liefert die Daten für diesen Parameter unter Verwendung von Ergebnissen aus früheren Studien, aus der Literatur sowie aus Experimenten, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden [30], [33]–[41]. Er stellt die durchschnittliche Masse der betrachteten EEG Typen dar.
P10	Recyclingkosten in Franken pro kg Gerät	$u_{M,17,y,d}^{dev}$	CHF/kg	Exogen	Dieser Parameter stellt die Behandlungskosten der ausgebauten EEG dar, einschließlich der Erlöse aus dem Verkauf von Sekundärrohstoffen, für Recyclingbetrieben in der Schweiz. Er basiert auf dem Preis, den SWICO mit seinen Recyclingpartnern für die Behandlung von Geräten der Kategorie "IT UE Rest" anwendet, exklusive Sammlung und Logistik [42].
P11	Durchschnittliche Anzahl eines Geräts pro Fahrzeug in der Gesamt Fahrzeugflotte, im Referenzjahr $t=ref$	$n_{d,t=ref}^{dev}$	1	Endogen	Die Daten für diesen Parameter werden dem Wirtschaftsmodul durch das Gesamtmodell (dMFA-Modul) zur Verfügung gestellt. Das dMFA-Modul liefert die Daten für diesen Parameter unter Verwendung von Ergebnissen aus früheren Studien oder aus der Literatur sowie von Annahmen, die im Rahmen von EVA II getroffen wurden [15], [30], [36]. Es handelt sich um die durchschnittliche Anzahl eines bestimmten Geräts in der Fahrzeugflotte, aufgeteilt nach Typ und Kategorie.
P12	Anteil jedes Gerätetyps, der für die Wiederverwendung ausgebaut wird	$k_{5-7,d}^{dev}$	-	Exogen	Dieser Parameter stellt den Anteil der einzelnen EEG-Typen dar, die in der Schweiz aus Altfahrzeugen ausgebaut werden, um als gebrauchte Ersatzteile verkauft zu werden. Die Daten dieses Parameters stammen aus Literaturquellen sowie Ergebnissen aus früheren Studien [30], [31], [43].
P13	Anteil der Trockenlegungen	$k_{5,v}^{veh}$	-	Exogen	Dieser Parameter stellt den Anteil der Kostenbeteiligung an der Trockenlegung der Altfahrzeuge dar. Die Daten für diesen Parameter werden durch die verschiedenen zu testenden Szenarien definiert. Diese Szenarien werden im Rahmen des Gesamtprojekts EVA II mit den relevanten Akteuren festgelegt.
P14	Kosten einer durchschnittlichen Trockenlegung	$u_{N,5,\alpha,v}^{veh}$	CHF/Fhz	Exogen	Dieser Parameter stellt den Betrag der Trockenlegung der Altfahrzeuge dar [29].
P15	Rückzahlung der Exporte	$B_{9,v}^{veh}$	-	Exogen	Dieser Parameter ist eine boolesche Variable, d. h. sie kann entweder 1 oder 0 sein (WAHR oder FALSCH). Sie stellt die Situation dar, dass der Beitrag zurückerstattet wird, wenn Fahrzeuge exportiert werden. Dieser Parameter wird durch die verschiedenen vorgesehenen Szenarien definiert. Diese Szenarien werden im Rahmen des Gesamtprojekts EVA II mit den relevanten Akteuren festgelegt.

2.3.3 Modulgleichungen

Im Wirtschaftsmodul werden die folgenden Fragen für ein Referenzjahr $t = \text{ref}$ beantwortet:

- Wie hoch sind die Gesamtkosten für die getrennte Verwertung von EEG nach Gerätetypen?
- Wie hoch sind die Kosten pro Altfahrzeug für die getrennte Verwertung von EEG nach Gerätetypen?
- Wie hoch sind die Gesamtkosten für die separate Verwertung von EEG für eine Auswahl von Gerätetypen?
- Wie hoch sind die Kosten pro Altfahrzeug für die separate Verwertung von EEG für eine Auswahl von Gerätetypen?
- Wie verteilen sich die Kosten auf die verschiedenen Phasen des Recyclings?

Die Modulgleichungen für das Wirtschaftsmodul basieren auf der Notation wie zuvor beschrieben. Tabelle 8 zeigt die verwendeten Modulgleichungen, wobei EQ1 – EQ16 Rechenschritte für die Berechnung der Gleichungen EQ17 – EQ20 darstellen.

Tabelle 8: Modellgleichungen des Wirtschaftsmoduls

ID	Beschreib der Variable	Gleichung
EQ1	Ausbaukosten pro Gerät, für jeden Gerätetyp	$u_{N,\alpha,d}^{dev} = u_{T,5,\alpha}^{dev} \cdot T_{\alpha,d}^{dev}$
EQ2	Transportkosten pro Gerät, für jeden Gerätetyp	$u_{N,\beta,d}^{dev} = u_{DM,5-17,\beta}^{dev} \cdot D_{5-17,\beta} \cdot m_d$
EQ3	Recyclingkosten pro Gerät, für jeden Gerätetyp	$u_{N,\gamma,d}^{dev} = u_{M,17,\gamma,d}^{dev} \cdot m_d$
EQ4	Gesamtkosten pro Gerät, für jeden Gerätetyp	$u_{N,5-17,d}^{dev} = u_{N,\alpha,d}^{dev} + u_{N,\beta,d}^{dev} + u_{N,\gamma,d}^{dev}$
EQ5	Gesamte Ausbaukosten für jeden Gerätetyp, inklusiv evtl. Trockenlegung.	$C_{\alpha,d}^{dev} = N_{x-5,t=\text{ref}}^{veh} \cdot (u_{N,\alpha,d}^{dev} \cdot n_{d,t=\text{ref}}^{dev} \cdot (1 - k_{5-7,d}^{dev}) + u_{N,5,\alpha,v}^{veh} \cdot k_{5,v}^{veh})$
EQ6	Gesamte Transportkosten für jeden Gerätetyp	$C_{\beta,d}^{dev} = u_{DM,5-17,\beta,d}^{dev} \cdot N_{x-5,t=\text{ref}}^{veh} \cdot n_{d,t=\text{ref}}^{dev} \cdot (1 - k_{5-7,d}^{dev})$
EQ7	Gesamte Recyclingkosten für jeden Gerätetyp	$C_{\gamma,d}^{dev} = u_{M,17,\gamma,d}^{dev} \cdot N_{x-5,t=\text{ref}}^{veh} \cdot n_{d,t=\text{ref}}^{dev} \cdot (1 - k_{5-7,d}^{dev})$
EQ8	Gesamtkosten für jede Gerätetyp	$C_{5-17,d}^{dev} = C_{\alpha,d}^{dev} + C_{\beta,d}^{dev} + C_{\gamma,d}^{dev}$
EQ9	Ausbaukosten pro Fahrzeug für jede Gerätetyp, inklusiv evtl. Trockenlegung	$u_{N,\alpha,d}^{veh} = \frac{C_{\alpha,d}^{dev}}{N_{x-5,t=\text{ref}}^{veh}}$
EQ10	Transportkosten pro Fahrzeug für jede Gerätetyp	$u_{N,\beta,d}^{veh} = \frac{C_{\beta,d}^{dev}}{N_{x-5,t=\text{ref}}^{veh}}$
EQ11	Recyclingkosten pro Fahrzeug für jede Gerätetyp	$u_{N,\gamma,d}^{veh} = \frac{C_{\gamma,d}^{dev}}{N_{x-5,t=\text{ref}}^{veh}}$

ID	Beschreib der Variable	Gleichung
EQ12	Gesamtkosten pro Fahrzeug für jede Gerätetyp	$u_{N,5-17,d}^{veh} = u_{N,\gamma,d}^{dev} + u_{N,\beta,d}^{dev} + u_{N,\alpha,d}^{dev}$
EQ13	Gesamte Ausbaurkosten einer Auswahl von n Gerätetypen	$C_{\alpha,l}^{dev} = \sum_{i=1}^n C_{\alpha,d_i}^{dev} \text{ for } i = 1, \dots, n$
EQ14	Gesamte Transportkosten einer Auswahl von n Gerätetypen	$C_{\beta,l}^{dev} = \sum_{i=1}^n C_{\beta,d_i}^{dev} \text{ for } i = 1, \dots, n$
EQ15	Gesamte Recyclingkosten einer Auswahl von n Gerätetypen	$C_{\gamma,l}^{dev} = \sum_{i=1}^n C_{\gamma,d_i}^{dev} \text{ for } i = 1, \dots, n$
EQ16	Gesamtkosten einer Auswahl von n Gerätetypen	$C_{5-17,l}^{dev} = C_{\alpha,l}^{dev} + C_{\beta,l}^{dev} + C_{\gamma,l}^{dev}$
EQ17	Gesamte Ausbaurkosten einer Auswahl von n Gerätetypen, pro Fahrzeug	$u_{N,\alpha,l}^{veh} = \frac{C_{\alpha,l}^{dev}}{N_{x-5,t=ref}^{veh}}$
EQ18	Gesamte Transportkosten einer Auswahl von n Gerätetypen, pro Fahrzeug	$u_{N,\beta,l}^{veh} = \frac{C_{\beta,l}^{dev}}{N_{x-5,t=ref}^{veh}}$
EQ19	Gesamte Recyclingkosten einer Auswahl von n Gerätetypen, pro Fahrzeug	$u_{N,\gamma,l}^{veh} = \frac{C_{\gamma,l}^{dev}}{N_{x-5,t=ref}^{veh}}$
EQ20	Gesamtkosten einer Auswahl von n Gerätetypen, pro Fahrzeug	$u_{N,5-17,l}^{veh} = u_{N,\alpha,l}^{dev} + u_{N,\beta,l}^{dev} + u_{N,\gamma,l}^{dev}$

2.4 Grenzen des Wirtschaftsmoduls

Der Aussagekraft des Moduls sind folgende Grenzen gesetzt:

- Kosten des Recyclings:** Für alle Gerätetypen wurden für das Recycling (d.h. die mechanische Auftrennung und Sortierung im Recyclingbetrieb) dieselben spezifischen Kosten verwendet (CHF/kg). Es wurde angenommen, dass die EEG in Fahrzeugen ähnlich genug sind, um gleiche Behandlungskosten zu verursachen. Die im Rahmen von EVA II durchgeführten Experimente zum Recycling haben jedoch gezeigt, dass Scheinwerfer quecksilberhaltige Leuchtmittel enthalten können, die vor der mechanischen Behandlung manuell entnommen werden müssen, während die anderen Gerätetypen in der Regel direkt mechanisch behandelt werden können [12]. Dieser Unterschied bei den Verarbeitungsschritten hat auch einen Einfluss auf die Behandlungskosten. Allerdings enthält die Kosten für das Recycling (die SWICO Kategorie "IT UE Rest", welche für hochwertige Heimelektronik verwendet wird) bereits diejenigen einer manuellen Behandlung. Daher sind die Behandlungskosten der EEG möglicherweise leicht zu hoch eingeschätzt.
- Annahmen zu den Gerätetypen:** Das Modul stellt eine Vereinfachung der Realität dar, da Gerätetypen auf ein möglichst repräsentatives Durchschnittsgerät reduziert werden. So

kann das Modul nicht die gesamte Vielfalt der verschiedenen Geräte aller Fahrzeugmodelle und Marken darstellen. Je nach Grösse und Preisklasse des Fahrzeugs können sich Geräte wie Scheinwerfer stark in Masse und Komplexität unterscheiden. Ein Kleinwagen besitzt beispielsweise eher kleine Frontscheinwerfer mit Grundfunktionen im Bereich von 2-3 kg, während bei einem Geländewagen die Frontscheinwerfer 4-5 kg schwer sind und sie eine Vielzahl an zusätzlichen Lampen, Elektromotoren zur präzisen Ausrichtung der Scheinwerfer und weiteren Funktionen enthalten können. Es gibt zudem Multifunktionsgeräte, welche verschiedene Funktionen in einem einzigen Gerät ausüben können. Zudem gibt es Geräte, welche auf verschiedenen Technologien beruhen, aber dieselbe Funktion ausüben. Ein Beispiel ist das ABS bzw. ESC System.

- **Verwaltungskosten eines Finanzierungssystems:** Diese wurden in der Studie nicht berücksichtigt
- **Referenzjahr:** Zum heutigen Zeitpunkt können die Kosten nur für ein Referenzjahr berechnet werden. Die dynamische Betrachtung über einen längeren Zeitraum ist im Modul nicht implementiert. Um mehrere wirtschaftliche Analysen des Systems, z.B. entlang eines Zeitraumes oder über mehrere Szenarien zu erhalten, müsste die Analyse mit anderen Eingangsdaten neu durchgeführt werden.
- **Datenlage:** Die Datenlage ist je nach Gerätetyp unterschiedlich gut: Für bestimmte Geräte ist die Datengrundlage sehr gut, für andere Geräte mangelhaft und in bestimmten Fällen fehlen Daten, um eine Kostenberechnung durchzuführen. Im Rahmen von EVA II ist das Datenmanagement im Bericht zu Datenerhebung und -management enthalten [12]. Bei einzelnen Geräten fehlen Daten zum durchschnittlichen Aufkommen im Fahrzeug. Hier mussten Abschätzungen vorgenommen werden. Weiter wird bei Geräten, die spezifisch für einen Antriebtyp sind (beispielsweise der Inverter bei Elektrofahrzeugen), vereinfachend angenommen, dass deren Anzahl proportional zum Anteil des Antriebstyps in der aktuellen Schweizer Fahrzeugflotte ist.
- **Momentaufnahme:** Die Berechnung der Kosten im Wirtschaftsmodul stellt eine Momentaufnahme dar. Die Erlöse und somit Nettokosten für Recyclingbetriebe sind stark abhängig von Rohstoffpreisen, der Zusammensetzung der in den Fahrzeugen enthaltenen EEG, oder Ausbaurate von Geräte für Wiederverwendung als gebrauchte Ersatzgeräte. Aus dieser Unsicherheit soll die vorliegende Kostenberechnung als ungefähre Schätzung interpretiert werden um die Grössenordnung der verschiedenen Kosten zu verstehen.

3 Ergebnisse

3.1 Exogene Parameter und Sensitivitätsanalyse

Für alle Berechnungen wurden die folgenden Werte für die exogenen Parameter (siehe Tabelle 9) verwendet, basierend auf der Methodik und den Referenzen, die in Tabelle 7 beschrieben sind.

Tabelle 9: Werte der exogenen Parameter

Parameter (t = ref)	Notation	Gewählter Wert	
Durchschnittliche Transportdistanz Geräte	$D_{5-17,\beta}^{dev}$	75 km	(Standardwert)
Arbeitskosten Fachperson	$u_{T,5,\alpha}^{dev}$	85 CHF/h	(Standardwert)
Recyclingkosten	$u_{M,17,\gamma,d}^{dev}$	71 CHF/t	(Standardwert)
Transportkosten	$u_{DM,5-17,\beta}^{dev}$	3.46 CHF/t*km	(Standardwert)

Tabelle 10 zeigt die Sensitivität der Ergebnisse infolge von Variationen der Werte der exogenen Parameter, anhand des Beispielgeräts «Steuergerät Infotainment». Die Tabelle zeigt, welchen Einfluss die unterstellten Annahmen auf die Gesamtkosten pro Fahrzeug haben.

Tabelle 10: Sensitivität der Kostenfaktoren am Beispiel Steuergerät: Infotainment

Transportdistanz	Arbeitskosten	Recyclingkosten	Gesamtkosten pro Altfahrzeug	Veränderung
km	[CHF/St]	[CHF/t]	CHF	
75	85	71	3.90	Referenz
25	85	71	3.65	-6%
150	85	71	4.27	9%
75	50	71	2.49	-36%
75	100	71	4.51	16%
75	85	0	3.80	-3%
75	85	200	4.09	5%

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse in Tabelle 10 zeigen den Einfluss der drei exogenen Parameter. Die Reduktion der Transportdistanz auf 25 km oder die Verdopplung auf 150 km beeinflussen die Gesamtkosten im Vergleich zur Referenz im einstelligen Prozentbereich. Eine starke Anpassung der Recyclingkosten zeigt ebenfalls nur geringe Einflüsse auf die Gesamtkosten pro Altfahrzeug. Variationen der Arbeitskosten haben dagegen die stärkste Auswirkung auf die Gesamtkosten.

3.2 Kosten des Ausbaus und separaten Recycling

Tabelle 11 zeigt die Gesamtkosten pro Altfahrzeug für verschiedene Gerätekategorien.

Tabelle 11: Gesamtkosten und Gesamtmasse der EEG jeder Gerätekategorie pro Altfahrzeug

Gerätekategorie	Kosten pro Fahrzeug	Masse pro Fahrzeug
	CHF	[kg]
EEG aller Gerätekategorien	190	40.01
EEG der Gerätekategorie "Aktuatoren"	134	19.70
EEG der Gerätekategorie "Steuergeräte"	45	9.95
EEG der Gerätekategorie "Scheinwerfer"	9	8.9

Die Gesamtkosten für alle Gerätetypen eines durchschnittlichen Fahrzeugs werden auf 190 CHF geschätzt. Dieser Betrag erreicht nur 0,5 % der durchschnittlichen Neupreis eines Fahrzeugs in der Schweiz von über 40'000 CHF [44].

Im Projekt EVA I, welches die Grundlage für das vorliegende Projekt EVA II bildete, wurde eine Liste von Fokusgeräten³ identifiziert, die aufgrund verschiedener Faktoren wie Wertstoffgehalt und häufiger Verfügbarkeit in Fahrzeugen das höchste Potenzial für einen Ausbau und ein separates Recycling aufweisen. Die Gesamtkosten (Ausbau, Logistik und Recycling) für diese Fokusgeräte würden 98 CHF pro Altfahrzeug betragen.

Abbildung 6 zeigt, wie sich die Gesamtkosten auf die Kostenpositionen Ausbau, Logistik und Recycling für jede Gerätekategorie pro durchschnittlichem Altfahrzeug⁴ in 2021 verteilen.

Bei den Modellierungen wurden die Kosten des Ausbaus von EEG sowie deren Logistik ermittelt. Für die Modellierung des Recyclings wurden sowohl die Kosten als auch die Erlöse aus dem Verkauf von Ersatzteilen berücksichtigt. Deshalb lassen sich die drei Kostenblöcke Ausbau, Logistik und Recycling nicht direkt miteinander vergleichen.

Falls man unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Voraussetzungen trotzdem einen Vergleich zieht, machen die Ausbaurkosten der EEG den grössten Anteil der Gesamtkosten aus. Der Ausbau stellt mit einem Anteil von 88–93% der Gesamtkosten den grössten Kostenfaktor dar. Dies ist auf die Arbeitskosten in der Schweiz und den grossen Aufwand des Ausbaus zurückzuführen. Die Kosten der Logistik bewegen sich im Bereich von 5–10% der Gesamtkosten. Recyclingkosten (mechanischen Verarbeitung in einem Recyclingbetrieb, inklusive Erlöse) machen nur 1–2% der Gesamtkosten aus.

³ Fokusgeräteliste EVA I: Aktuatoren Bremsanlage [in EVA I genannt: "ABS Block"], Alternator, Anlasser, Fensterhebermotor, Kühlerlüftermotor, Scheibenwischermotor, Steuergerät Antriebsmotor [in EVA I genannt: "Motorsteuergerät"], Steuergerät Insassenschutz [in EVA I genannt: "Airbagsteuergerät"], Steuergerät Infotainment [in EVA I genannt: "Navigationssystem & Radio/CD"], Kombiinstrument [in EVA I genannt: "Tachoinstrument" & "Multifunktionsanzeige"].

⁴ Der Durchschnitt aller Altfahrzeuge rezykliert in der Schweiz im Referenzjahr 2021

Hervorzuheben ist, dass die Erlöse aus dem Recycling ausschliesslich den Recyclern zugerechnet werden, und so teilweise die Kosten des Recyclings kompensieren. Die Bruttokosten⁵ des Recyclings werden in diesem Modul nicht berechnet.

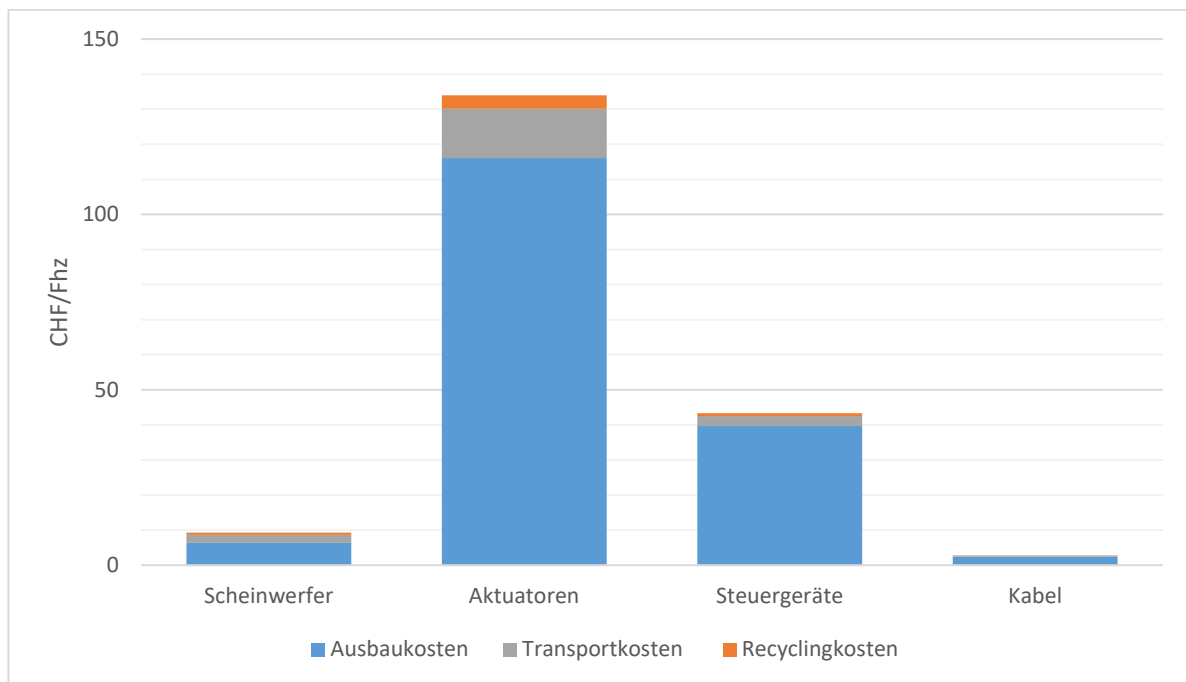


Abbildung 6: Gesamtkosten der EEG jeder Gerätekategorie pro durchschnittlichen Altfahrzeug. Die Erlöse aus dem Recycling werden ausschliesslich den Recyclingbetrieben zugerechnet. Somit kann ein Teil der Recyclingkosten kompensiert werden. Die Recyclingkosten in der Abbildung stellen die verbleibenden Kosten nach Abzug der Erlöse dar.

Abbildung 7 zeigt die Gesamtkosten (Ausbau, Logistik und Recycling) für jeden Gerätetyp für ein durchschnittliches Altfahrzeug im Referenzjahr 2021. Weitere Ergebnisse und wichtige Parameterwerte für jeden Gerätetyp befinden sich in Anhang C.

Der Altfahrzeugmix in der Schweiz im Jahr 2021 wird mit über 99% von Verbrennungsantrieben dominiert. Dies bedeutet, dass Gerätetypen, die nur in Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen, im heutigen durchschnittlichen Altfahrzeug (definiert als der Durchschnitt aller Altfahrzeuge rezykliert in der Schweiz im Referenzjahr) so gut wie nicht vorhanden sind. Diese Gerätetypen sind meist frei von Schadstoffen (mit Ausnahme von Scheinwerfern, die Hg-haltige Dioden enthalten können). Der Schadstoffentfrachtungsschritt ist allerdings in der Schätzung der Recyclingkosten für alle Gerätekategorien enthalten (Schadstoffentfrachtung würde zusätzliche Kosten verursachen). Die wahren Recyclingkosten könnten daher für Steuergeräte, Aktuatoren und Kabel kleiner sein. Zudem enthalten Steuergeräte signifikante Mengen an Wertstoffen wie Gold und Silber, die einen wichtigen Teil der Erträge des Recyclers ausmachen.

⁵ Alle Kosten für die Durchführung des Recyclings (Personalkosten, Energie, Infrastruktur, Transport usw.), ohne Berücksichtigung der erhaltenen Erlöse (Verkauf von Sekundärrohstoffen).

Die Ausbaurkosten von Gerätetypen, welche im Altfahrzeugmix von 2021 sehr selten sind, verteilen sich in der Berechnung die Kosten auf alle Altfahrzeuge. Daher erscheinen sie in dieser Betrachtung als sehr gering. Dies betrifft Gerätetypen die spezifisch für Fahrzeuge mit Elektroantrieb sind, da diese im Referenzjahr 2021 eine sehr geringe Anzahl an Altfahrzeugen darstellen. Die Ausbaurkosten pro Altfahrzeug bewegen sich, je nach Gerätetyp, zwischen 1 – 25 CHF.

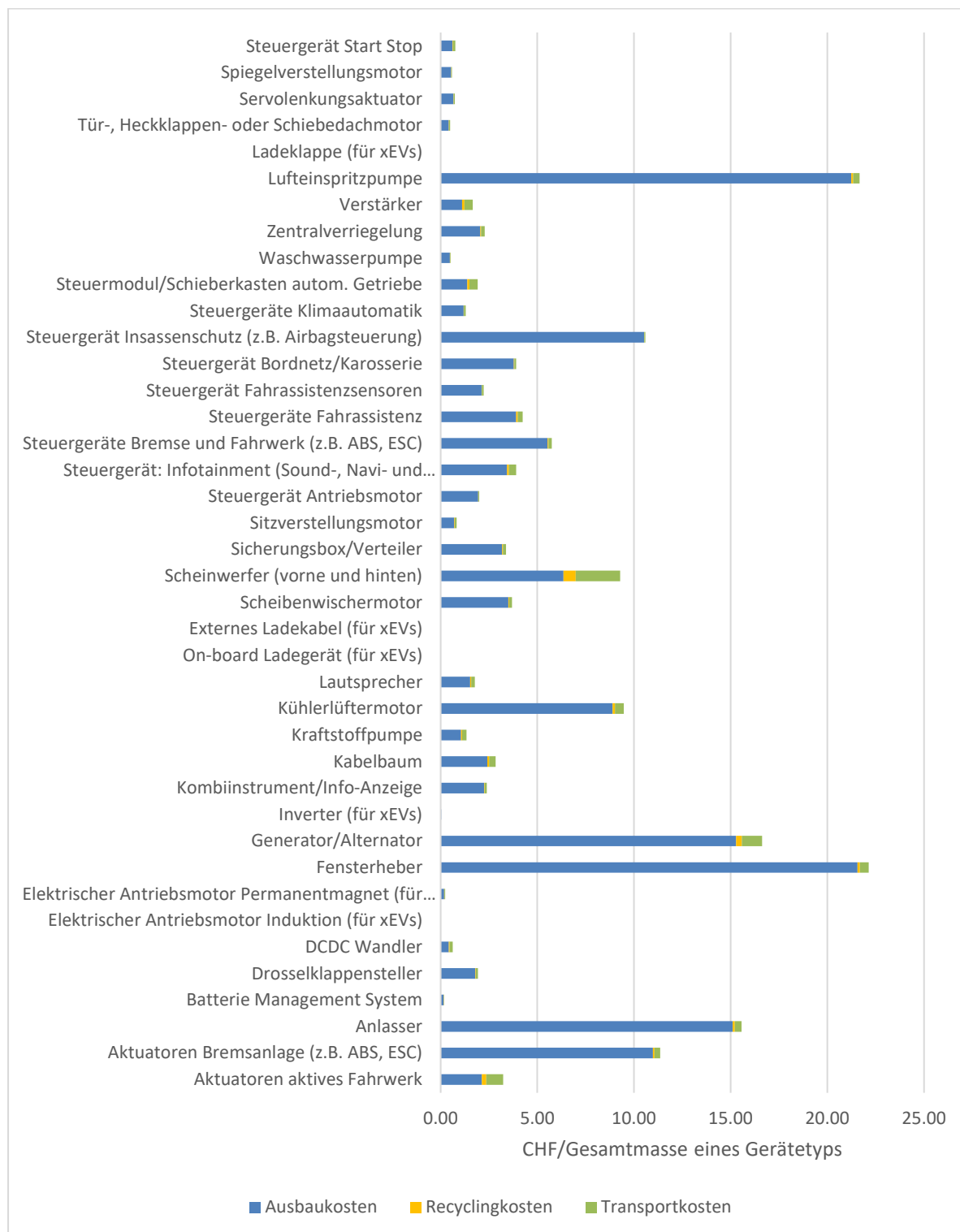


Abbildung 7: Gesamtkosten für die Gesamtmasse jedes Gerätetyps pro Altfahrzeug (Referenzjahr 2021)

Aus ökonomischer Sicht ist der Gerätetyp "Scheinwerfer" interessant. Die Scheinwerfer sind stets am gleichen Ort verbaut, nicht tief im Fahrzeug eingebettet und vergleichsweise schwer. All diese Eigenschaften wirken sich günstig auf die Ausbaurkosten pro Kilo Scheinwerfer aus, welche 80-90% der Gesamtkosten eines Gerätetyps verursachen.

Die Ausbaurkosten der Gerätetypen innerhalb der Gerätekategorie "Steuergerät" sind vergleichsweise eher hoch, allerdings mit starken Schwankungen. Steuergeräte sind meist kleine und leichte Geräte mit 0.5 - 1 kg Masse. Sie sind in vielen Fällen tief im Fahrzeug eingebettet, was die Ausbaurkosten pro kg erhöht. Der Ausbauraufwand von Steuergeräten könnte möglicherweise reduziert werden, falls sie sich an einer ähnlichen Stelle im Fahrzeug befinden.

Bestimmte Gerätetypen werden bereits heute aus Altfahrzeugen entfernt und für den Ersatzteilmarkt genutzt. Für die Berechnung der Kosten des Ausbaus für das Recycling wird der Anteil an bereits heute ausgebauten Geräten abgezogen. Beispielsweise würden die Gesamtkosten (Ausbau, Logistik und Recycling) des Geräts "Alternator" 24.38 CHF pro Altfahrzeug betragen. Da allerdings im heutigen System ca. 32% der Alternatoren bereits ausgebaut werden, muss der Anteil dieser Geräte nicht finanziert werden. Somit liegen die Gesamtkosten für den Gerätetyp Alternator bei 16.62 CHF.

3.3 Mögliche Weiterentwicklungen

Das Modul ermöglicht die Bestimmung der Kostenfaktoren für Gerätetypen, wie auch für einen beliebigen EEG-Mix. Es können Parameter angepasst werden, welche die Gesamtkosten beeinflussen.

Das Modul könnte wie folgt weiterentwickelt werden:

- Aufnahme weiterer Gerätetypen, z.B. antriebspezifische Gerätetypen aus Elektrofahrzeugen.
- Hinzufügen weiterer Daten für die untersuchten Gerätetypen, wie die Aufteilung der EEG nach Fahrzeugmodell.
- Die Kostenfaktoren wie Transport sowie Kosten der mechanischen Auftrennung könnten weiter verfeinert werden. Sie könnten zudem dynamisch angepasst werden, je nach aktueller Veränderung der Preise.

4 Schlussfolgerungen

Im vorliegende Bericht sind die Kosten des Ausbaus und separaten Recyclings von EEG dargestellt. Die Ergebnisse dienen als Entscheidungshilfe für die Beurteilung der wirtschaftlichen Tragbarkeit des Ausbaus und separaten Recyclings von EEG aus Altfahrzeuge im Rahmen der Bestimmungen der VREG. Dazu wurde ein Modul entwickelt, in welchem verschiedene Gerätetypen kombiniert und deren Kosten für Ausbau, Logistik und Recycling ermittelt werden können.

Die Ergebnisse der Kostenmodellierung zeigen, dass die Ausbaurkosten den grössten Anteil der Gesamtkosten des separaten EEG Recycling darstellen. Da EEG in Fahrzeugen fest verbaut sind, ist für deren Ausbau eine Fachperson notwendig. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu manuellen Prozessschritten für Geräte der Heimelektronik, wo vergleichsweise einfache Arbeitsschritte (z.B. Entfernung aller grossen Leiterplatten von Laptops) durchgeführt werden.

Die Logistik- und Recyclingkosten sind deutlich niedriger als der Ausbau. Es ist zu berücksichtigen, dass in den Recyclingkosten der Erlös der zurückgewonnenen Materialien miteingerechnet wurde. Die Netto-Recyclingkosten sind deshalb geringer. Die Fahrzeugelektronik ist mit Ausnahme der Scheinwerfer kaum schadstoffbelastet. Das bedeutet, dass eine manuelle Schadstoffentfrachtung nicht notwendig ist, was die Recyclingkosten noch mehr reduzieren könnte. Die genaue Bestimmung der Erlöse und Bruttokosten vom Recycling ist jedoch schwierig, da Informationen hierzu dem Betriebsgeheimnis der Recycler unterliegen und diese abhängig von den Rohstoffpreisen sind.

Aus ökonomischer Sicht ist der Gerätetyp "Scheinwerfer" interessant: Er hat ein vergleichsweise hohes Gewicht, ist immer am gleichen Ort verbaut und an der Oberfläche der Fahrzeuge eingebettet. Die Ausbaurkosten pro kg Gerät sind deshalb klein. Die Ausbaurkosten der Gerätetypen innerhalb der Gerätekategorie "Steuergerät" sind vergleichsweise eher hoch, weil sie in der Regel kleiner und tiefer eingebettet sind.

Der heutige Fahrzeugbestand der Schweiz besteht weitgehend aus Autos mit Verbrennungsmotor. Es ist davon auszugehen, dass der Anteil an Elektrofahrzeugen in Zukunft steigen wird. Elektrofahrzeuge enthalten im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor antriebspezifische Gerätetypen, welche aus stofflicher Sicht wertvoll sind. Elektrofahrzeuge sind einfacher im Aufbau als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, was den Ausbauraufwand reduziert [45]. Diese Faktoren müssten in einer zukünftigen Studie berücksichtigt werden. Es ist möglich, dass beim Recycling von EEG aus Elektrofahrzeugen Kosten und Ertrag stärker beieinanderliegen als beim heutigen Mix an Altfahrzeugen.

Das im Bericht vorgestellte Wirtschaftsmodul sowie das Berechnungstool können je nach Verfügbarkeit weiterer Daten auf zusätzliche Gerätetypen ausgeweitet werden. Die Ergebnisse aller Module werden im Rahmen von EVA II in einem Synthesebericht zusammengeführt.

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. Hirsch, 'Projekt EVA: Elektronik – Verwertung – Altfahrzeuge: 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 – Altfahrzeuge: "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: Dynamisches Stoffflussmodul - Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 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, M. Capelli, and H. Böni, 'Projekt EVA II: Wirtschaftsmodul - Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2023.
- [11] C. Marmy et al., 'Projekt EVA II: Elektronik - Verwertung - Altfahrzeuge Eingebettete Elektronikgeräte in Personenfahrzeugen Arbeitspaket 3.3: Ökobilanzmodul Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, Feb. 2022.
- [12] 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.
- [13] C. Marmy, 'Projekt EVA II: Zukünftige Materialflüsse in der Schweizerischen Fahrzeugflotte - Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2023.
- [14] C. Marmy, M. Capelli, and H. Böni, 'Projekt EVA II: Synthesebericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2023.


- [15] 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.
- [16] Schweizerische Bundesrat, ChemRRV. 2022. Accessed: Nov. 04, 2022. [Online]. Available: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/de>
- [17] SARS, 'Geshredderte Fahrzeuge 2008-2018', Stiftung Autorecycling Schweiz, Bern, 2019.
- [18] SARS, 'Annual Report 2019', Stiftung Auto-Recycling Schweiz, 2020. [Online]. Available: <https://stiftung-autorecycling.ch/downloads>
- [19] SARS, 'Annual Report 2020', Stiftung Auto-Recycling Schweiz, 2021. [Online]. Available: <https://stiftung-autorecycling.ch/downloads>
- [20] BFS, 'Strassenfahrzeugbestand: Personenwagen 2010-2014', Bundesamt für Statistik (BFS), Bern, Apr. 2016. Accessed: May 12, 2019. [Online]. Available: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/daten.assetdetail.269638.html>
- [21] BFS, 'Strassenfahrzeugbestand: Personenwagen 2005-2009', Bundesamt für Statistik (BFS), Bern, Feb. 2015. Accessed: May 12, 2019. [Online]. Available: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/daten.assetdetail.290135.html>
- [22] BFS, 'Strassenfahrzeugbestand: Personenwagen ab 2015', Bundesamt für Statistik (BFS), Bern, Jan. 2019. Accessed: May 12, 2019. [Online]. Available: https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/daten.html?dyn_prodima=900175
- [23] BFS, 'Strassenfahrzeugbestand nach Fahrzeuggruppe', Bundesamt für Statistik (BFS), Bern, May 2019. Accessed: May 12, 2019. [Online]. Available: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassenfahrzeuge-bestand-motorisierungsgrad.assetdetail.8469801.html>
- [24] BFS, 'Neue Inverkehrsetzungen von Strassenfahrzeugen nach Fahrzeuggruppe und Fahrzeugart - 1990-2021 | Tabelle', Bundesamt für Statistik (BFS), Bern, Datenbericht, Jan. 2022. Accessed: Feb. 07, 2022. [Online]. Available: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/tabellen.assetdetail.20884438.html>
- [25] BFS, 'Les scénarios de l'évolution de la population de la Suisse et des cantons 2020–2050', Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://www.bfs.admin.ch/bfsstatic/dam/assets/14963222/master>
- [26] BFS, 'Strassenfahrzeuge im Jahr 2021: Neue Inverkehrsetzungen und Gesamtbestand | Bundesamt für Statistik', Strassenfahrzeuge im Jahr 2021: Neue Inverkehrsetzungen und Gesamtbestand | Bundesamt für Statistik, Jan. 31, 2022. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/aktuell/neue-veroeffentlichungen.gnpdetail.2022-0184.html> (accessed Feb. 07, 2022).
- [27] BFS, 'Neue Inverkehrsetzungen von Strassenfahrzeugen nach Fahrzeuggruppe und Fahrzeugart - 2005-2021 | Tabelle', Bundesamt für Statistik, Jan. 31, 2022. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/tabellen.assetdetail.20884560.html> (accessed Feb. 07, 2022).




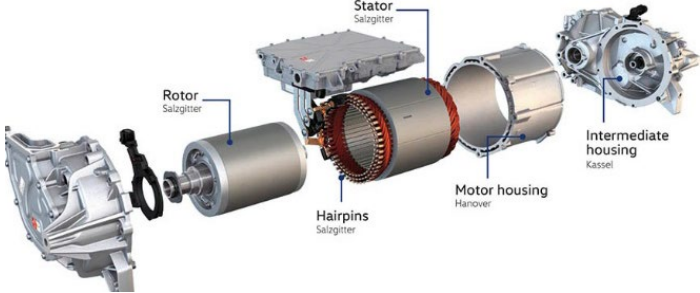
- [28] C. Marmy and M. Capelli, 'Project EVA II - Meeting of the working group: Workshop with experts from the automotive sector in Switzerland on evolution trends and projections of the electrification of the Swiss passenger cars fleet for scenario Building.' Empa (not published), Mar. 21, 2021.
- [29] M. Capelli, 'Project EVA II: Interview with Thomas Ramseyer from Ramseyer Autoverwertung AG von VASSO'. Empa (not published), Nov. 10, 2021.
- [30] E. Restrepo, A. Loevik, 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.
- [31] E. Restrepo, A. Loevik, and R. Widmer, 'Projekt "EVA" Szenarien und Dynamik: Schlussbericht zu der Arbeitspaket C3', St. Gallen, 2018.
- [32] M. Capelli, 'Projekt EVA II Interview with Expert Logistics firm (Cargo24)'. Empa (not published), Nov. 02, 2022.
- [33] C. Marmy et al., 'Projekt EVA II - Eingebettete Elektronikgeräte in Personenfahrzeugen: Resultate der Datenbeschaffungsaktivitäten und Versuche', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, not published yet 2022.
- [34] E. Restrepo, A. N. Løvik, P. Wäger, R. Widmer, R. Lonka, and D. B. Müller, 'Stocks, flows and distribution of critical metals in embedded electronics in passenger vehicles', *Environmental Science & Technology*, vol. 51, no. 3, pp. 1129–1139, 2017, doi: 10.1021/acs.est.6b05743.
- [35] E. Restrepo, A. N. Løvik, R. Widmer, P. Wäger, and D. B. Müller, 'Historical Penetration Patterns of Automobile Electronic Control Systems and Implications for Critical Raw Materials Recycling', *Resources*, vol. 8, no. 2, p. 58, 2019, doi: 10.3390/resources8020058.
- [36] M. Groke, W. Kaerger, K. Sander, and M. Bergamos, 'Optimierung der Separation von Bauteilen und Materialien aus Altfahrzeugen zur Rückgewinnung kritischer Metalle (ORKAM)', Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau, Germany, 2017. Accessed: Oct. 30, 2018. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/2017-01-11_texte_02-2017_orkam_endbericht.pdf
- [37] J. Yano, G. Xu, H. Liu, T. Toyoguchi, H. Iwasawa, and S. Sakai, 'Resource and toxic characterization in end-of-life vehicles through dismantling survey', *J Mater Cycles Waste Manag*, Aug. 2019, doi: 10.1007/s10163-019-00902-9.
- [38] J. D. Widmer, R. Martin, and M. Kimiabeigi, 'Electric vehicle traction motors without rare earth magnets', *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 3, pp. 7–13, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.susmat.2015.02.001.
- [39] R. Widmer, X. Du, O. Haag, E. Restrepo, and P. A. Wäger, 'Scarce Metals in Conventional Passenger Vehicles and End-of-Life Vehicle Shredder Output', *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 7, pp. 4591–4599, Apr. 2015, doi: 10.1021/es505415d.
- [40] R. T. Nguyen, D. D. Imholte, A. C. Matthews, and W. D. Swank, 'NdFeB content in ancillary motors of U.S. conventional passenger cars and light trucks: Results from the field', *Waste Management*, vol. 83, pp. 209–217, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2018.11.017.





- [41] A. N. Løvik et al., 'Material composition trends in vehicles: critical raw materials and other relevant metals Preparing a dataset on secondary raw materials for the Raw Materials Information System', Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC Technical Report JRC126564, 2021. [Online]. Available: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC126564>
- [42] M. Capelli and C. Marmy, 'Project EVA II: Interview with Denis Lackovic and Roger Gnos from SWICO'. Empa (not published), Sep. 28, 2021.
- [43] M. Capelli, C. Marmy, and H. Böni, 'Projekt "EVA II": Elektronik - Verwertung - Altfahrzeuge Eingebettete Elektronikgeräte in Personenfahrzeugen Resultate einer Umfrage zum Verbleib von Ersatzgeräten bei Fahrzeugreparaturen', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, Sep. 2021.
- [44] AGVS and AutoScout24, 'Marktindex Personenwagen Schweiz'. Jan. 23, 2017. [Online]. Available: <https://www.agvs-zs.ch/de/news/news-archiv/neuwagenpreise-steigen-occasionspreise-bleiben-tief>
- [45] 'EV Vs ICE: Are Electric Cars Worth It? | Mer UK', Jun. 01, 2022. <https://uk.mer.eco/news/ev-vs-ice-are-electric-cars-worth-it/> (accessed Feb. 03, 2023).



Anhang A Liste der identifizierten Gerätetypen




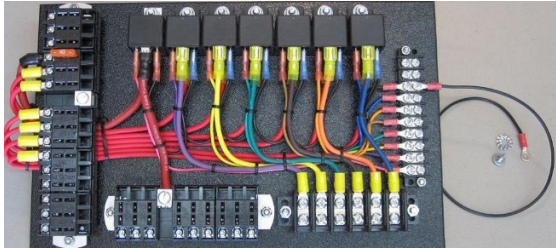
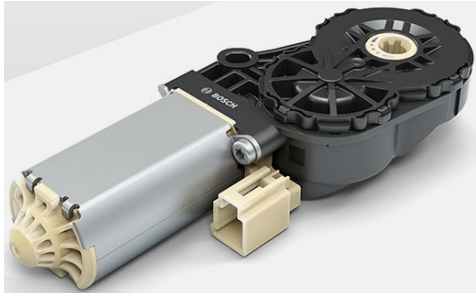
Bei einzelnen Geräten fehlen Daten, weshalb sie nicht im dynamischen Massenflussmodell und im Wirtschafts- und Ökobilanzmodul integriert sind. Dies betrifft besonders EEG welche spezifisch zu Elektrofahrzeugen sind (ID: 4, 7, 8, 19)

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

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-mediacycenter.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/	

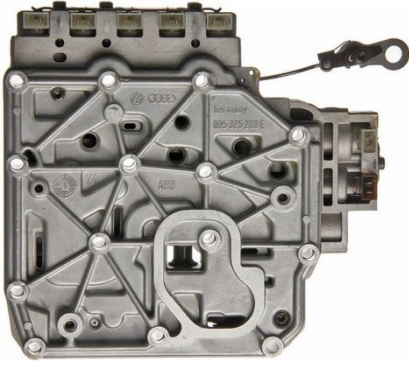

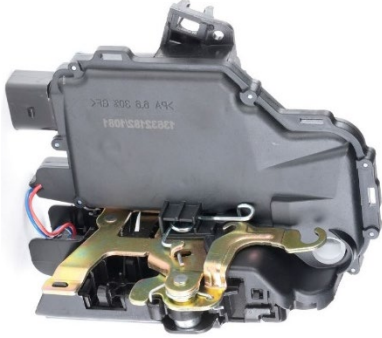

ID 09	
Gerätetyp Fensterheber Standardbezeichnung ElectricWindowsMotor Geräteklasse Aktuator	
Quelle: https://www.eeuroparts.com/Parts/461538/Power-Window-Motor-and-Regulator-Assembly-Front-Driver-Left-WL41364/	
ID 10	
Gerätetyp Generator/Alternator Standardbezeichnung Alternator Geräteklasse Aktuator	
Quelle: https://www.beupp.com/generator/what-is-the-difference-between-an-alternator-and-a-generator/	
ID 11	
Gerätetyp Inverter Standardbezeichnung Inverter Geräteklasse Inverter	
Quelle: https://www.wogas.ch/spannungswandler-wechselrichter-auto-power-inverter-konverter-300w.html	
ID 12	
Gerätetyp Kombiinstrument/Info-Anzeige Standardbezeichnung CombinedInstrumentDisplay Geräteklasse Steuergerät	
Quelle: https://www.autoteile-markt.de/shop/instrumente-tachometer	






<p>ID 13</p> <p>Gerätetyp Kabelbaum</p> <p>Standardbezeichnung WiringHarness</p> <p>Gerätekategorie Kabelartiges Gerät</p> <p>Quelle: https://www.kurth-classics-autoparts.de/de/kabelbaume/746-motorkabelbaum-a1295406005.html</p>	
<p>ID 14</p> <p>Gerätetyp Kraftstoffpumpe</p> <p>Standardbezeichnung FuelPump</p> <p>Gerätekategorie Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.mein-autolexikon.de/motor/kraftstoffpumpe.html</p>	
<p>ID 15</p> <p>Gerätetyp Kühlerlüftermotor</p> <p>Standardbezeichnung HeaterAndACFanMotor</p> <p>Gerätekategorie Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.autodoc.de/tyc/7489545</p>	
<p>ID 16</p> <p>Gerätetyp Lautsprecher</p> <p>Standardbezeichnung Speaker</p> <p>Gerätekategorie Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.multipланet.ch/lautsprecher-bass/fahrzeugspezifische-systeme-lautsprecher/mercedes1586/#page=1&specialsOnly=0</p>	
<p>ID 17</p> <p>Gerätetyp On-board Ladegerät (Elektrofahrzeug)</p> <p>Standardbezeichnung BatteryCharger</p> <p>Gerätekategorie Steuergerät</p> <p>Quelle: https://wheele.de/produkt/on-board-charger/</p>	

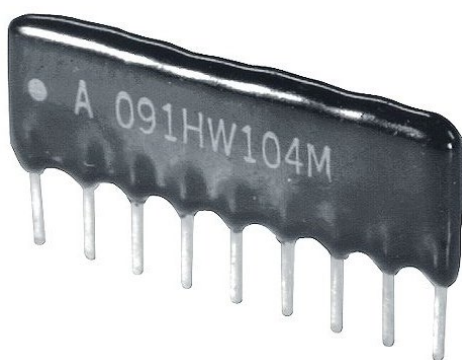
<p>ID 18</p> <p>Gerätetyp Externes Ladekabel (Elektrofahrzeug)</p> <p>Standardbezeichnung ChargeCord</p> <p>Geräteklasse Kabel</p> <p>Quelle: https://www.khonseve.com/product/ev-1-phase-charger/</p>	
<p>ID 19</p> <p>Gerätetyp Scheibenwischermotor</p> <p>Standardbezeichnung WiperMotor</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.b-parts.com/en/store/products/2343901/rear-wiper-motor-audi-a6-allroad-c6-4fh-32-fsi-quattro-4f9955711b-e1-b6-8-1-2006-2007-2008-2009-2010-2011/</p>	
<p>ID 20</p> <p>Gerätetyp Scheinwerfer (vorne und hinten)</p> <p>Standardbezeichnung Light</p> <p>Geräteklasse Scheinwerfer</p> <p>Links: Quelle: https://www.pkweiteile.de/ersatzteil/ruckleuchte Rechts: Quelle: https://www.hella.com/partnerworld/de/Produktprogramm/Fahrzeug-Beleuchtung/Hauptscheinwerfer-3214/</p>	
<p>ID 21</p> <p>Gerätetyp Sicherungsbox/Verteiler</p> <p>Standardbezeichnung FuseBox</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.tuningblog.eu/kategorien/tuning-wiki/sicherungskasten-255816/</p>	
<p>ID 22</p> <p>Gerätetyp Sitzverstellungsmotor</p> <p>Standardbezeichnung SeatMotor</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/aktuatoren/sitzverstellantrieb/</p>	

ID 23	
Gerätetyp Steuergerät Antriebsmotor Standardbezeichnung EngineControlUnit Geräteklasse 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 Geräteklasse 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 Geräteklasse Steuergerät	
Quelle: https://www.hella.com/techworld/de/Technik/Elektrik-Elektronik/ABS-ESP-Steuergeraete-fuer-Brems-und-Fahrdynamik-56049/	
ID 26	
Gerätetyp Steuergerät Fahrassistenz Standardbezeichnung AdaptiveCruiseControlController ElectronicPowerSteeringController ParkAssistantController Geräteklasse Steuergerät	
Quelle: https://www.programainc.com/item_list.aspx?idcategory=38	

<p>ID 27</p> <p>Gerätetyp</p> <p>Steuergerät Fahrassistentensensoren</p> <p>Standardbezeichnung</p> <p>ParkingCameraController SignRecognitionCameraController ParkingRadarController</p> <p>Gerätekategorie</p> <p>Steuergerät</p> <p>Quelle: https://www.hella.com/hella-com/assets/media_global/2018.08.10_HELLA_Geschaeftsbericht_2018_360_Autonom_DE_geschuetzt.pdf</p>	
<p>ID 28</p> <p>Gerätetyp</p> <p>Steuergerät Infotainment (Sound-, Navi-, und Multimedia)</p> <p>Standardbezeichnung</p> <p>InfotainmentNavigationSystem NavigationSystem SoundSystem</p> <p>Gerätekategorie</p> <p>Steuergerät</p> <p>Quelle: VW Display and Control Panel Genuine Volkswagen Part OE-Nr. 6C0-035-8, 399,90 € (bus-ok.de)</p>	
<p>ID 29</p> <p>Gerätetyp</p> <p>Steuergerät Insassenschutz (z.B. AirbagSteuerung)</p> <p>Standardbezeichnung</p> <p>AirbagController</p> <p>Gerätekategorie</p> <p>Steuergerät</p> <p>Quelle: https://www.endera.de/airbagsteuergeraet-reparatur-vw-golf-iv.html</p>	
<p>ID 30</p> <p>Gerätetyp</p> <p>Steuergerät Klimaautomatik</p> <p>Standardbezeichnung</p> <p>HabitacleClimateController SeatHeatingController</p> <p>Gerätekategorie</p> <p>Steuergerät</p> <p>Quelle: https://autodogs.de/produkt/bmw-e90-e91-klimabedienteil-bedienteil-klimaautomatik-6199260-klima-schalter/</p>	

<p>ID 31</p> <p>Gerätetyp Steuermodul/Schieberkasten autom. Getriebe</p> <p>Standardbezeichnung TransmissionControlUnit</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p> <p>Quelle: https://classicparts.de/Schieberkasten-fuer-4-Gang-Automatikgetriebe-Getriebekennbuchstabe-APCCBYCFBAPECBZCFCAPBCFA-Corrado</p>	
<p>ID 32</p> <p>Gerätetyp Waschwasserpumpe</p> <p>Standardbezeichnung WindshieldWasherPump</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.biltema.dk/en-dk/car---mc/car-spares/washer-equipment/washer-pumps/washer-pump-2000038246</p>	
<p>ID 33</p> <p>Gerätetyp Zentralverriegelung</p> <p>Standardbezeichnung DoorLockActuator</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.autodoc.de/autoteile/schlosser-aussen-10787</p>	
<p>ID 34</p> <p>Gerätetyp Verstärker</p> <p>Standardbezeichnung AudioAmplifier</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p> <p>Quelle: https://www.techinn.com/en/sony-xmn1004-car-amplifier/137910321/p</p>	

<p>ID 35</p> <p>Gerätetyp Luftspritzpumpe</p> <p>Standardbezeichnung EngineAirInjectionPump</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.fcpeuro.com/products/bmw-air-pump-e46-pierburg-11727553056</p>	
<p>ID 36</p> <p>Gerätetyp Ladeklappe (Elektrofahrzeug)</p> <p>Standardbezeichnung PlugInsertPanel</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://akro-plastic.com/de/aktuelles/praxisbeispiele/ladeklappe-e-auto/</p>	
<p>ID 37</p> <p>Gerätetyp Tür-, Heckklappen- oder Schiebedachmotor</p> <p>Standardbezeichnung DoorHatchMotor SunroofMotor</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.amazon.de/T%C3%BCrschloss-Motorschloss-motorsperre-Lenkschloss-Radmotor/dp/B084P484W4</p>	
<p>ID 38</p> <p>Gerätetyp Servolenkungsaktuator</p> <p>Standardbezeichnung PowerSteeringActuator</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.caranddriver.com/features/a27888229/power-steering/</p>	
<p>ID 39</p> <p>Gerätetyp Spiegelverstellungsmotor</p> <p>Standardbezeichnung MirrorMotor</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://w220.wiki/File:W220_exterior_mirror_motor_A2038202242_opened_inside.jpg</p>	

ID 40	 <p>A grey rectangular electronic control unit with a label that reads 'Continental', 'Made in Hungary', and 'COFOR 94563K 02'. It has several electrical connectors on the bottom.</p>
Gerätetyp Steuergerät Start Stop Standardbezeichnung StartStopController Geräteklasse Controller	
Quelle: https://www.franceauto.pl/de_DE/p/Start-Stop-Steuergerät-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	 <p>A black, curved electronic component with multiple silver pins at the bottom. It is labeled 'A 091HW104M'.</p>
Gerätetyp Kondensator-Array für EV Standardbezeichnung CapacitorsEV Geräteklasse Controller	
Quelle: https://www.distrelec.ch/en/ceramic-capacitor-array-100nf-50v-20-hosonic-8c7-104m50x/p/16572366	
ID 42	 <p>A complex mechanical actuator with various metal components, bolts, and a central shaft.</p>
Gerätetyp Verteilergetriebe Standardbezeichnung TransferShiftActuator Geräteklasse Aktuator	
Quelle: https://bs-getriebetechnik.de/BMW-X3-Verteilergetriebe-generalueberholt-27103455137-27103455135-Bj-2003-2011	
ID 43	 <p>A silver electronic control unit with a black Bosch logo and 'H2586' marking. It has several electrical connectors on the left side.</p>
Gerätetyp Vehicle Control Unit Standardbezeichnung VehicleControlUnit Geräteklasse Controller	
Quelle: https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/fahrzeugcomputer/vehicle-control-unit/	

Anhang B Liste der EEG Bestandteile

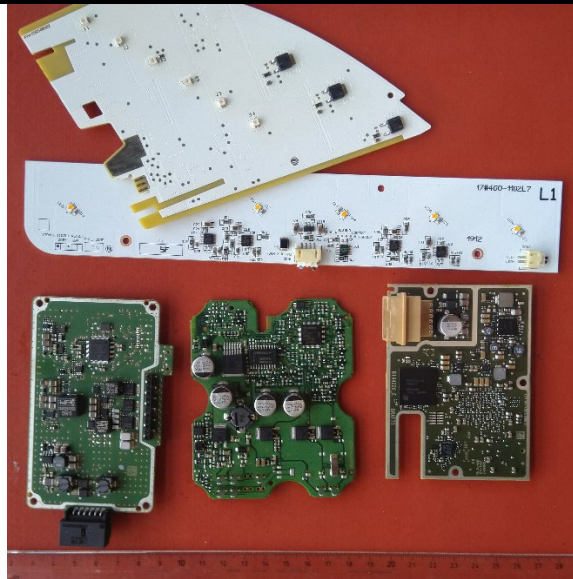
Bestandteil	Name in Datenbank	Enthalten in	Enthaltene relevante Materialien
Leiterplatte	PCB	Aktuatoren, Controller, Scheinwerfer	Edelmetalle (Gold, Silber, Platin), Kupfer, Kunststoffe
Stecker	Cables and connectors	Controller	Kunststoffe, Kupfer
Motor	Motor	Aktuatoren	Eisen, Kupfer, Neodym
Bildschirm	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, Controller, Scheinwerfer	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

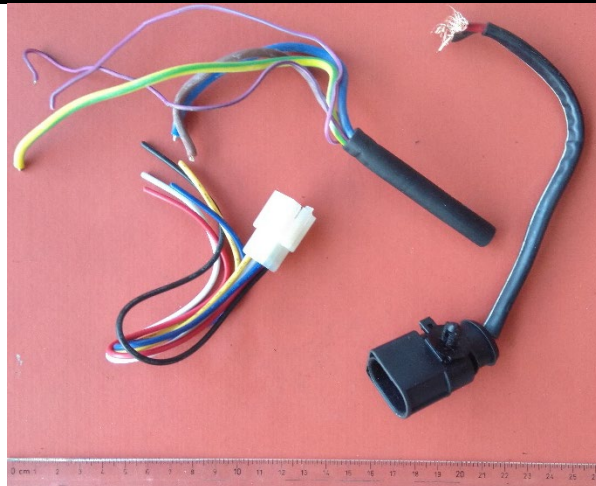
Eine Leiterplatte (engl. Printed circuit board, PCB) ist ein Träger aus Kunststoff für elektronische Bauteile (Kondensatoren, Prozessoren, elektrische Widerstände, etc.). Diese befindet sich unter anderem in Steuergeräten und enthält Kupfer (Cu) und viele Arten von Seltenen Technologie Metalle (STM),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

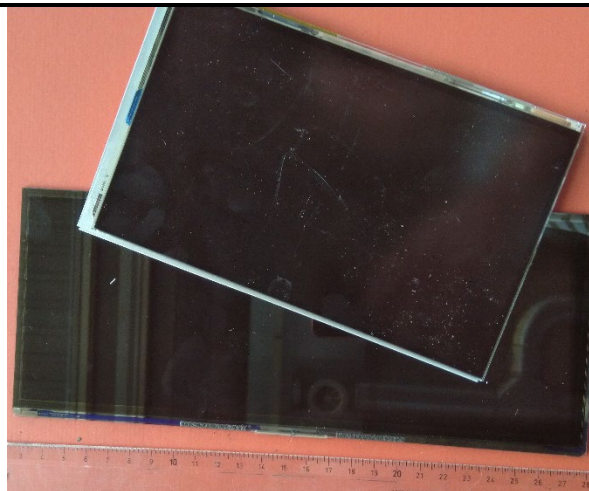
Ein Motor ist eine Maschine, die aus elektrischer Energie Bewegung erzeugt. Der Aufbau besteht aus einer Stahl- oder Eisenstruktur (Stator und Rotor), welche sich in einem metallischen Gehäuse befindet, und Kupferwicklungen. Ein Motor enthält auch meistens ferrit- oder Neodym-reiche Magnete. Motoren 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 Kunststoffolie, LED-Lichter, Aluminiumumrahmung, etc.

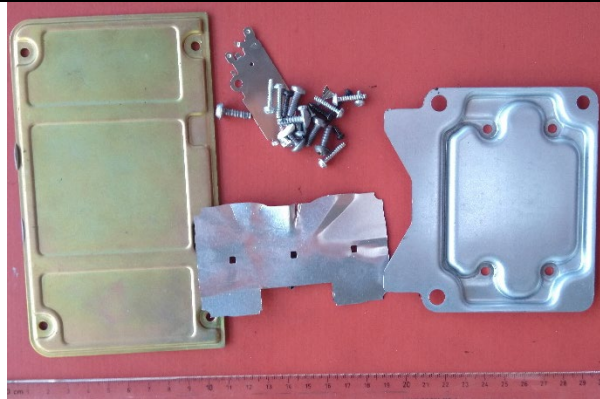


Komponente

Fe-Teile

Beschreibung

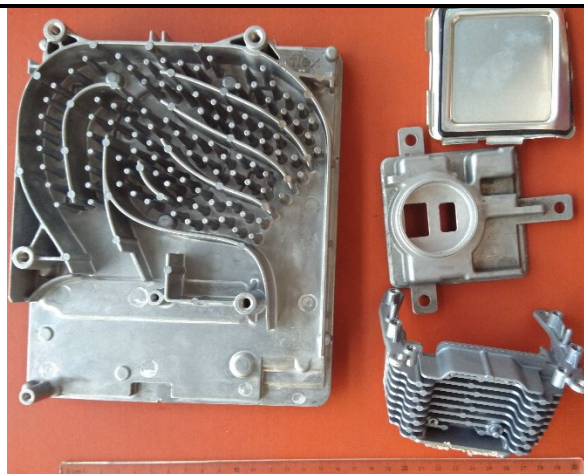
Eisen (Fe) als Element besitzt die Eigenschaften breite Verfügbarkeit (die es zu einem preiswerten Rohstoff macht) sowie Zähigkeit und Festigkeit von Eisenlegierungen. Es wird in der Regel nicht reines Fe verwendet, sondern Stahl oder Legierungen (z.B. Edelstahl), um gewisse Eigenschaften zu verbessern 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 grostechnisch eingesetzt werden bei Elektromotoren, Transformatoren und Generatoren.

**Komponente**

Al-Teile

Beschreibung

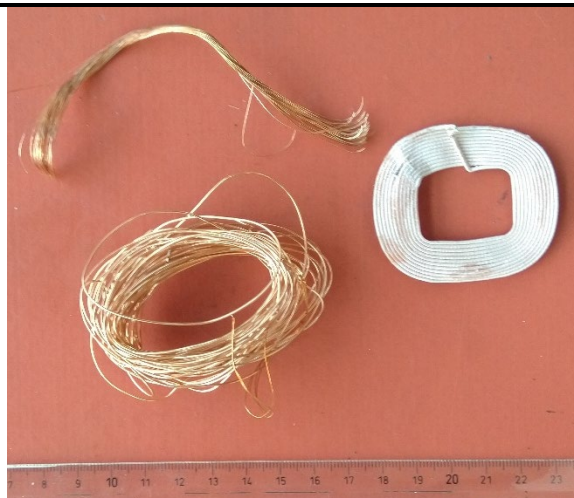
Aluminium (Al) als Element ist ein guter Leiter für Wärme und elektrischen Strom. Al-Teile enthalten oft auch andere Elemente in Form von Legierungsmitteln (Cu, Mg, Mangan (Mn), Silikon (Si), Zinn (Sn), Zink (Zn)) oder Unreinheiten (vor allem bei gegossenen Al-Teilen). Es wird häufig eingesetzt bei Radiatoren, 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 Glühlampen wird ein Wolframdraht durch Zufuhr von Elektrizität erhitzt. Als Nebenprodukt der Wärme wird Licht abgegeben. Bei LED-Lichtern wird Strom durch einen kristallinen Halbleiter geleitet, der dann Licht emittiert. LED-Lichter sind energieeffizienteren Leuchtmittel. Xenon-Glühlampen 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 Flammschutzmittel enthalten (solche wurden jedoch während der Arbeit am vorliegenden Projekt nicht 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.



Komponente

Andere Metalle

Beschreibung

z.B. Zinn, Messing, Blech, Magnesium-Legierungen, Blei. In diese Komponente fallen alle Metalle oder Metalllegierungen, die zu keiner der anderen Kategorien gehören.

**Komponente**

Elektrisches Kabel

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.

**Komponente**

Stecker zu elektrischem Kabel

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.



Quelle: Die wichtigsten Ladekabel- und Steckertypen für Elektroautos – Magazin für Elektromobilität (energieloesung.de)



Komponente

Rest

Beschreibung

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



Anhang C Wichtige Parameter des Wirtschaftsmoduls

Tabelle 12: Wichtige Parameter und Inputdaten

Gerätetyp			Parameter und Inputdaten								
ID	Name	Kategorie	Durchschn. Masse	Durchschn. Ausbauzeit		Ausbauanteil gebrauchte Ersatzteile	Durchschnittlichen Anzahl pro Alt-Fhz				
			[g]	[min]	Unsicherheitsgrad		Alle	ICEV	HEV	PHEV	BEV
01	AktuatorenaktivesFahrwerk	Aktuator	3'333	1.50	+	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
02	AktuatorenBremsan- lage(z.B.ABS,ESC)	Aktuator	1'967	13.11	+++	0.41	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
03	Anlasser	Aktuator	3'265	25.64	+++	0.58	0.99	1.00	0.00	0.00	0.00
04	BatterieManagementSystem	Aktuator	250	20.00	(+)	0.00	0.01	0.00	1.00	1.00	1.00
05	Drosselklappensteller	Aktuator	484	1.39	++	0.09	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
06	DCDCWandler	Steuergerät	603	0.30	+	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
07	ElektrischerAntriebsmotorInduk- tion(für xEVs)	Aktuator	63'333	25.00	(+)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37
08	ElektrischerAntriebsmotorPerma- nentmagnet(für xEVs)	Aktuator	31'332	25.00	(+)	0.00	0.01	0.00	1.00	1.00	0.77
09	Fensterheber	Aktuator	1'025	8.89	+++	0.39	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82
10	Generator/Alternator	Aktuator	5'969	15.91	+++	0.32	0.99	1.00	0.00	0.00	0.00
11	Inverter(für xEVs)	Steuergerät	13'550	1.50	+	0.00	0.01	0.00	1.00	1.00	1.00
12	Kombiinstrument/Info-Anzeige	Steuergerät	741	3.07	+++	0.48	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
13	Kabelbaum	Kabeln	1'300	1.70	+++	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
14	Kraftstoffpumpe	Aktuator	886	0.74	++	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
15	Kühlerlüftermotor	Aktuator	2'319	8.32	+++	0.25	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
16	Lautsprecher	Aktuator	338	0.50	+++	0.29	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
17	On-boardLadegerät(für xEVs)	Steuergerät		10.00	(+)	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
18	ExternesLadekabel(für xEVs)	Kabeln		0.00	(+)	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
19	Scheibenwischermotor	Aktuator	1'544	6.71	+++	0.75	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50

Gerätetyp			Parameter und Inputdaten								
ID	Name	Kategorie	Durchschn. Masse	Durchschn. Ausbauezeit		Ausbauanteil gebrauchte Ersatzteile	Durchschnittlichen Anzahl pro Alt-Fhz				
			[g]	[min]	Unsicherheitsgrad		Alle	ICEV	HEV	PHEV	BEV
20	Scheinwerfer(vorne und hinten)	Scheinwerfer	2'223	1.12	+++	0.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
21	Sicherungsbox/Verteiler	Steuergerät	593	2.25	++	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
22	Sitzverstellungsmotor	Aktuator	1'030	1.54	++	0.00	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
23	SteuergerätAntriebsmotor	Steuergerät	712	6.66	+++	0.74	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
24	SteuergerätBordnetz/Karosserie	Steuergerät	350	2.75	+++	0.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
25	SteuergerätBremsenundFahrwerk(z.B.ABS,ESC)	Steuergerät	813	4.63	(+)	0.16	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
26	SteuergerätFahrassistentz	Steuergerät	1'074	2.91	+++	0.05	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
27	SteuergerätFahrassistentzsensoren	Steuergerät	355	1.49	+++	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
28	SteuergerätInfotainment(Sound-,Navi-,undMultimedia)	Steuergerät	1'610	2.73	+++	0.09	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
29	SteuergerätInsassenschutz	Steuergerät	282	9.07	+++	0.17	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
30	SteuergerätKlimaautomatik	Steuergerät	362	0.90	+++	0.07	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
31	Steuermodul/SchieberkastenautomatischesGetriebe	Steuergerät	1'635	0.97	++	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
32	Waschwasserpumpe	Aktuator	101	0.34	++	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
33	Zentralverriegelung	Aktuator	716	1.48	+++	0.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
34	Verstärker	Steuergerät	1'672	0.78	+	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
35	Lufteinspritzpumpe	Aktuator	1'295	15.00	(+)	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
36	Ladeklappe(fürxEVs)	Aktuator	706	0.50	(+)	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
37	Tür-,Heckklappen-oderSchiebedachmotor	Aktuator	419	0.59	+	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
38	Servolenkungsaktuator	Aktuator	2'164	4.78	+++	0.30	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14

Gerätetyp			Parameter und Inputdaten								
ID	Name	Kategorie	Durchschn. Masse	Durchschn. Ausbaupzeit		Ausbauanteil gebrauchte Ersatzteile	Durchschnittlichen Anzahl pro Alt-Fhz				
			[g]	[min]	Unsicherheitsgrad		Alle	ICEV	HEV	PHEV	BEV
39	Spiegelverstellungsmotor	Aktuator	165	0.50	(+)	0.00	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
40	SteuergerätStartStop	Steuergerät	450	0.43	+	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
41	Kondensator-Array(fürxEVs)	Steuergerät				0.00	0.01	0.00	1.00	1.00	1.00
42	Verteilergetriebe	Aktuator	1'399	30.00	(+)	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
43	VehicleControlUnit(fürxEVs)	Steuergerät		4.63	(+)	0.00	0.01	0.00	1.00	1.00	1.00

Legende Unsicherheitsgrad

(+) = 0 Datenpunkte, Schätzungen, + = 1-5 Datenpunkte, ++ = 5 - 10 Datenpunkte, +++ = mehr als 10 Datenpunkte

Tabelle 13: Hauptergebnisse des Gesamtmodells

Gerätetyp			Kosten pro Alt-Fhz				Umweltnutzen pro Alt-Fhz		
ID	Name	Kategorie	Ausbau CHF	Transport CHF	Recycling CHF	Gesamt CHF	UBP 2021	EF 3.0	GWP [kg CO2 eq]
01	Aktuatoren aktives Fahrwerk	Aktuator	2.13	0.86	0.24	3.23	1.2E+04	2.0E-03	5.2E+00
02	Aktuatoren Bremsanlage (z.B. ABS, ESC)	Aktuator	10.97	0.30	0.08	11.36	4.1E+03	6.9E-04	1.8E+00
03	Anlasser	Aktuator	15.11	0.35	0.10	15.56	4.8E+03	8.1E-04	2.1E+00
04	Batterie Management System	Aktuator	0.15	0.00	0.00	0.15	4.5E+00	7.7E-07	2.0E-03
05	Drosselklappensteller	Aktuator	1.79	0.11	0.03	1.93	1.5E+03	2.2E-03	6.9E-01
06	DCDC Wandler	Steuergerät	0.43	0.16	0.04	0.62	8.5E+03	2.6E-04	1.4E+00
07	Elektrischer Antriebsmotor Induktion (für xEVs)	Aktuator	0.01	0.00	0.00	0.01	4.6E+01	7.8E-06	2.1E-02
08	Elektrischer Antriebsmotor Permanent-magnet (für xEVs)	Aktuator	0.18	0.04	0.01	0.23	5.5E+02	9.4E-05	2.5E-01
09	Fensterheber	Aktuator	21.56	0.45	0.12	22.14	6.1E+03	1.0E-03	2.8E+00
10	Generator/Alternator	Aktuator	15.28	1.05	0.29	16.62	1.4E+04	2.4E-03	6.3E+00
11	Inverter (für xEVs)	Steuergerät	0.03	0.00	0.00	0.03	9.9E+02	2.5E-04	1.7E-01
12	Kombiinstrument/Info-Anzeige	Steuergerät	2.26	0.10	0.03	2.38	5.4E+03	1.4E-03	9.1E-01
13	Kabelbaum	Kabeln	2.41	0.34	0.09	2.84			
14	Kraftstoffpumpe	Aktuator	1.05	0.23	0.06	1.34	3.1E+03	5.3E-04	1.4E+00
15	Kühlerlüftermotor	Aktuator	8.89	0.45	0.12	9.47	6.1E+03	1.0E-03	2.7E+00
16	Lautsprecher	Aktuator	1.52	0.19	0.05	1.76	2.5E+03	4.3E-04	1.1E+00
17	On-board Ladegerät (für xEVs)	Steuergerät	0.00	0.00	0.00	0.00			
18	Externes Ladekabel (für xEVs)	Kabeln	0.00	0.00	0.00	0.00			
19	Scheibenwischermotor	Aktuator	3.50	0.15	0.04	3.69	2.0E+03	3.4E-04	8.9E-01
20	Scheinwerfer (vorne und hinten)	Scheinwerfer	6.35	2.30	0.63	9.28	1.4E+05	2.7E-02	5.0E+01
21	Sicherungsbox/Verteiler	Steuergerät	3.18	0.15	0.04	3.38	8.3E+03	2.1E-03	1.4E+00
22	Sitzverstellungsmotor	Aktuator	0.71	0.09	0.02	0.82	1.2E+03	2.0E-04	5.2E-01
23	Steuergerät Antriebsmotor	Steuergerät	1.94	0.04	0.01	1.99	2.1E+03	5.3E-04	3.5E-01

Gerätetyp			Kosten pro Alt-Fhz				Umweltnutzen pro Alt-Fhz		
ID	Name	Kategorie	Ausbau CHF	Transport CHF	Recycling CHF	Gesamt CHF	UBP 2021	EF 3.0	GWP [kg CO2 eq]
24	Steuergerät Bordnetz/Karosserie	Steuergerät	3.43	0.37	0.10	3.90	4.8E+03	1.2E-03	8.1E-01
25	Steuergerät Bremse und Fahrwerk (z.B. ABS, ESC)	Steuergerät	2.11	0.09	0.03	2.23	9.7E+03	2.5E-03	1.6E+00
26	Steuergerät Fahrassistenz	Steuergerät	10.52	0.06	0.02	10.59	1.4E+04	3.7E-03	2.4E+00
27	Steuergerät Fahrassistenzsensoren	Steuergerät	0.61	0.12	0.03	0.76	5.0E+03	1.3E-03	8.4E-01
28	Steuergerät Infotainment (Sound-, Navi-, und Multimedia)	Steuergerät	3.43	0.37	0.10	3.90	2.0E+04	5.2E-03	3.4E+00
29	Steuergerät Insassenschutz	Steuergerät	5.53	0.18	0.05	5.75	3.2E+03	8.3E-04	5.5E-01
30	Steuergerät Klimaautomatik	Steuergerät	3.91	0.26	0.07	4.24	4.7E+03	1.2E-03	8.0E-01
31	Steuermodul/Schieberkasten automatisches Getriebe	Steuergerät	1.37	0.42	0.12	1.91	2.3E+04	5.9E-03	3.9E+00
32	Waschwasserpumpe	Aktuator	0.48	0.03	0.01	0.51	3.5E+02	6.0E-05	1.6E-01
33	Zentralverriegelung	Aktuator	2.04	0.18	0.05	2.27	2.4E+03	4.1E-04	1.1E+00
34	Verstärker	Steuergerät	1.11	0.43	0.12	1.66	2.4E+04	6.0E-03	4.0E+00
35	Lufteinspritzpumpe	Aktuator	21.24	0.34	0.09	21.67	4.5E+03	7.7E-04	2.0E+00
36	Ladeklappe (für xEVs)	Aktuator	0.00	0.00	0.00	0.00	2.1E+00	3.5E-07	9.3E-04
37	Tür-, Heckklappen- oder Schiebedachmotor	Aktuator	0.42	0.05	0.01	0.49	7.3E+02	1.2E-04	3.3E-01
38	Servolenkungsaktuator	Aktuator	0.66	0.05	0.01	0.73	7.4E+02	1.3E-04	3.3E-01
39	Spiegelverstellungsmotor	Aktuator	0.55	0.03	0.01	0.59	4.4E+02	7.6E-05	2.0E-01
40	Steuergerät Start Stop	Steuergerät	1.18	0.09	0.02	1.29	6.3E+03	1.6E-03	1.1E+00
41	Kondensator-Array (für xEVs)	Steuergerät	0.00	0.00	0.00	0.00			
42	Verteilergetriebe	Aktuator	21.25	0.18	0.05	21.48	2.4E+03	4.2E-04	1.1E+00
43	Vehicle Control Unit (für xEVs)	Steuergerät	0.01	0.02	0.00	0.03			

