

Material- verwertungsmodul

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

Begleitung Bundesamt für Umwelt: Isabelle Baudin

Bearbeitung

¹Empa, Technology and Society Lab, Critical Materials and Resource Efficiency Group, 9014 St. Gallen

AutorInnen

Charles Marmy¹

Manuele Capelli¹

Heinz Böni¹

Titelbild: ©C. Marmy, 2022

Hinweise

Diese Studie wurde mit finanzieller Unterstützung vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) und der Stiftung Autorecycling Schweiz (SARS) durchgeführt. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich. Die Autoren bedanken sich herzlich bei Markus Stengele und Christoph Solenthaler (Solenthaler Recycling AG), sowie bei die Firmen Pro Business House AG, Häfeli Brügger AG, Altola AG und Bachema AG und ihre Mitarbeiter für die hervorragende Unterstützung und Beratung.

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	4
1.4	Ziel des Projekts EVA II.....	5
1.5	Das Gesamtmodell.....	7
1.6	Ziel des Materialverwertungsmoduls.....	10
2	Methodik	11
2.1	Ansatz	11
2.2	Struktur des Materialverwertungsmoduls.....	12
2.3	Mathematische Modellierung	19
3	Ergebnisse	22
3.1	Zurückgewonnene Materialien durch separates EEG-Recycling	22
3.2	Grenzen und mögliche Weiterentwicklungen	29
4	Schlussfolgerungen.....	30
5	Referenzen	31
Anhang A	Liste der identifizierten Gerätetypen.....	33
Anhang B	Liste der EEG Bestandteile	43

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	6
Tabelle 3:	In der Modellierung berücksichtigten Elemente und Materialien.....	12
Tabelle 4:	Datenquellen der Massenanteile der enthaltenen Materialien.....	13
Tabelle 5:	Massenanteile der primären Fraktionen sowie der Elemente und Materialien jeder Gerätekategorie.....	16
Tabelle 6:	Aufteilung der Elemente und Materialien von primären Fraktionen zu sekundären Fraktionen durch sekundäre Trennung.	17
Tabelle 7:	Verteilung der Elemente und Materialien von primären und sekundären Fraktionen in sekundäre Rohstoffe durch verschiedene Rückgewinnungsprozesse.....	18
Tabelle 8	Notation für Grössen und Modellvariablen.....	19
Tabelle 9	Notation für Aspekte und Dimensionen.	19
Tabelle 10:	Notation für Entitäten und Modellebenen	20
Tabelle 11:	Parameter der Modellierung	21
Tabelle 12:	Modellgleichungen des Materialverwertungsmoduls.....	21

Abbildungen

Abbildung 1:	Illustrierung der Nomenklatur zur Kategorisierung der EEG im Rahmen des Projekts EVA II. Wie für die in dieser Abbildung dargestellte Gerätekategorie "Steuergeräte" enthält auch die Gerätekategorie "Aktuatoren" mehrere Gerätetypen. Die Gerätekategorie "Scheinwerfer" enthält jedoch nur den Gerätetyp "Scheinwerfer (vorne und hinten)", was in der Abbildung durch identische Bilder in beiden Spalten dargestellt ist. Auf der rechten Seite wird am Beispiel der Scheinwerfer dargestellt, dass ein bestimmter Gerätetyp mehrfach in einem Fahrzeug vorkommen kann.....	3
Abbildung 2:	Konzeptuelle Architektur des Gesamtmodells (EVA II).....	7
Abbildung 3:	Übersicht über das modellierte schweizerische Altfahrzeugverwertungssystem	9
Abbildung 4:	Aufbau des Materialverwertungsmoduls	15
Abbildung 5:	Struktur der für physikalische Grössen im mathematischen Modell verwendeten Notation.	20
Abbildung 6:	Sankey 100 kg EEG der Kategorie "Aktuator"	24
Abbildung 7:	Sankey 100 kg EEG der Kategorie "Steuergerät"	25
Abbildung 8:	Sankey 100 kg EEG der Kategorie "Scheinwerfer"	26
Abbildung 9:	Sankey 100 kg EEG der Kategorie "Kabel"	27
Abbildung 10:	Sankey aller EEG aus in der Schweiz rezyklierten Alt-Fhz (2021).....	28

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

Zusammenfassung

Moderne Personenwagen enthalten eine beträchtliche Menge an eingebetteten elektronischen Geräten (EEG). Im Durchschnitt wird das Gesamtgewicht aller EEG pro Fahrzeug auf 30 bis 50 kg geschätzt. In den letzten Jahren hat die Anzahl dieser Geräte stark zugenommen. Ähnlich wie Heimelektronikgeräte (Computer, Telefon, Drucker, Bildschirme usw.) bestehen sie grösstenteils aus Industriemetallen (Eisen, Aluminium und Kupfer), enthalten aber auch viele Seltene Technologiemetalle (STM) wie Edelmetalle, Indium, Lithium, Germanium, Neodym oder Tantal. 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 mechanisch behandelt. Die in EEG enthaltenen STM konzentrieren sich nach dieser mechanischen Behandlung in der Schredderleichtfraktion (RESH) auf, welche mit den Siedlungsabfällen verbrannt wird. Dabei geht der grösste Teil der enthaltenen STM verloren.

Der Ausbau der EEG und deren separate Verwertung in einer Elektroschrott-Recyclinganlage, könnte eine höhere Rückgewinnung dieser Elemente und weitere Materialien, inklusive der wertvollen STM, ermöglichen. Die Verwendung von optimierten Auftrennungsprozessen und Schredderanlagen, welche besser für die Verwertung von Elektronikschrott geeignet sind, ermöglichen die Produktion von reineren Fraktionen und eine kleinere RESH Mengen.

Das Materialverwertungsmodul ist Bestandteil eines im Rahmen des Projekts "EVA II" (Elektronik Verwertung Altautos) erstellten Modells zur Abbildung des Schweizerischen Altfahrzeug-Recyclingsystems. Mit dem Modul lässt sich das Rückgewinnungspotenzial einer Auswahl an Metallen und Kunststoffen aus eingebetteten elektronischen Geräte (EEG) in Personenfahrzeugen bei einer Verarbeitung in einer Schweizer Elektroschrott-Recyclinganlage bestimmen. Es kann so als Teil des Monitoringsystems zur Messung der Leistung des Schweizer Altfahrzeugrecyclingsystems dienen.

Für diese Studie werden die vier folgende Kategorien von Gerätetypen analysiert: Aktuatoren, Steuergeräte, Scheinwerfer und Kabel. Die fünfte Kategorie Sensoren ist nicht teil der Analyse aufgrund der geringen Grösse und Materialgehalt. Die Auftrennung dieser Gerätekategorien in verschiedene Fraktionen durch die mechanische Behandlung in einer Recyclinganlage wurde in einem Batchversuch untersucht und als Datengrundlage für die Modellierung verwendet. Das Modul zeigt den hohen Kunststoffanteil in Scheinwerfern, welcher ein signifikantes Rückgewinnungspotenzial darstellt. Weiterhin ist die mögliche Rückgewinnung von Edelmetalle aus Leiterplatten aus Scheinwerfern, Aktuatoren sowie insbesondere bei den Steuergeräten durch den separaten Ausbau und Recycling deutlich erhöht. Für die Industriemetalle Eisen, Aluminium zeigt die Modellierung keine Verbesserung durch den EEG Ausbau.

Die Ergebnisse des Materialverwertungsmoduls werden für die weitere Untersuchung der ökologischen wie ökonomischen Aspekte des EEG Recyclings im Rahmen von EVA II verwendet.

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

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

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

- Die Kategorie "**Steuergerät**" (auch Controller genannt) umfasst alle Geräte, die Steuerungsaufgaben im Fahrzeug übernehmen, wie beispielsweise die Steuerung der 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).

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

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

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 die-

nen, 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].

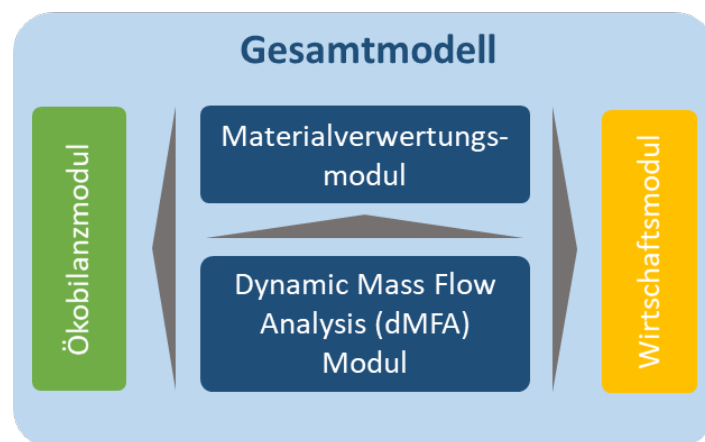


Abbildung 2: Konzeptuelle Architektur des Gesamtmodells (EVA II)

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.

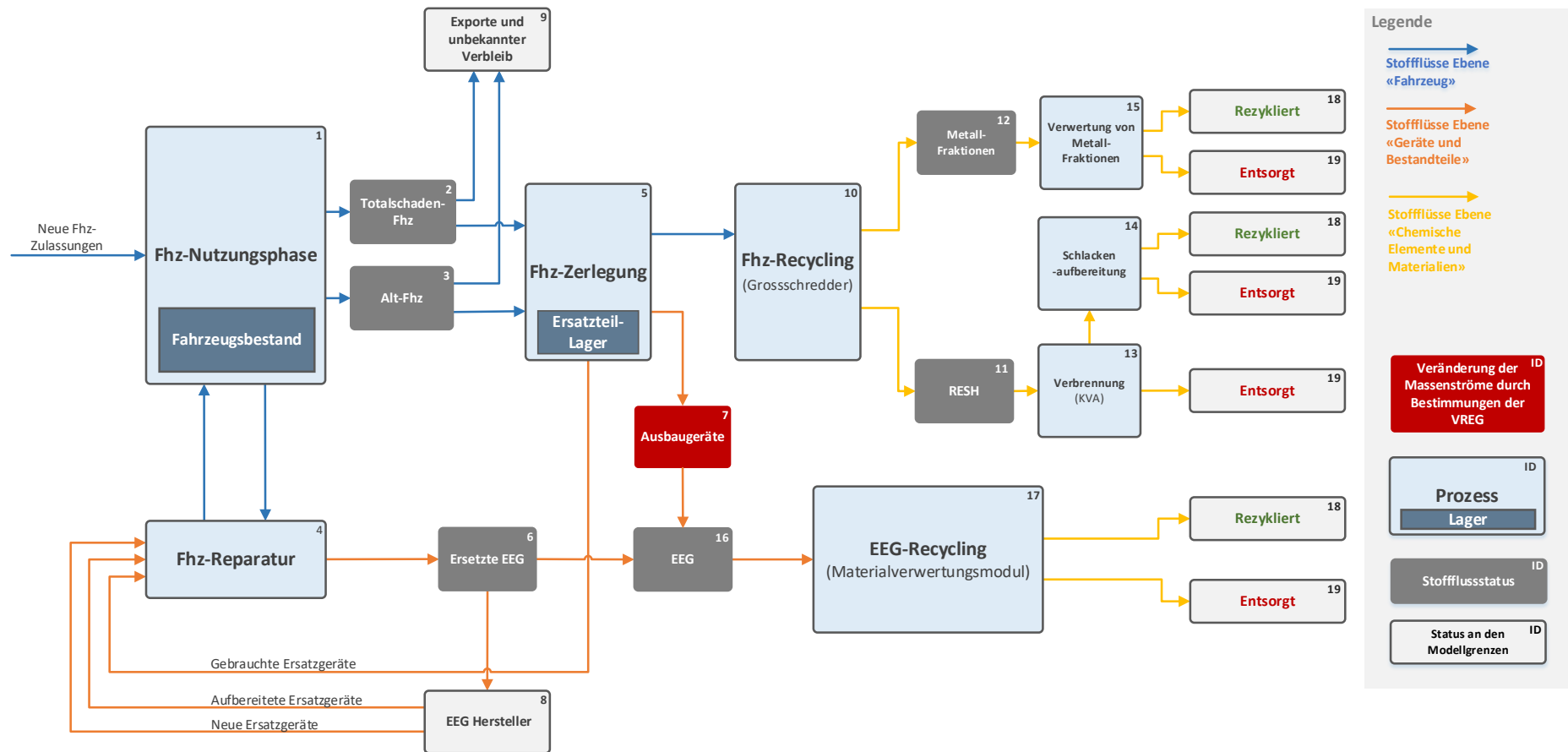


Abbildung 3: Übersicht über das modellierte schweizerische Altfahrzeugverwertungssystem

1.6 Ziel des Materialverwertungsmoduls

Im heutigen System verbleiben alle Geräte, die nicht als Ersatzteile für den Verkauf ausgebaut werden, im Fahrzeug und werden mit diesem geschreddert. Ein Teil der STM, besonders die auf Leiterplatten enthaltenen Edelmetalle wie Gold, Silber und Palladium, landen im RESH, welcher verbrannt wird [2]. Zusätzlich gehen weitere Materialien wie verschiedene Kunststoffe ebenfalls verloren. Die in EEG sich befindenden Industriemetalle Eisen, Aluminium und ein Teil des Kupfers können über die bestehenden Recyclingprozesse weitestgehend zurückgewonnen werden. Gemäss der VREG müssen Geräte, für die der Ausbau und das separate Recycling wirtschaftlich tragbar und ökologisch sinnvoll ist, aus den Fahrzeugen vor der Behandlung im Grossschredder entfernt werden. Das UVEK bestimmt Gerätetypen, welche diese Bedingungen erfüllen und fasst sie auf einer "Ausbaugeräteliste" zusammen.

Der Ausbau und das Recycling von EEG müsste folgende Anforderungen erfüllen:

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

Ziel des Materialverwertungsmoduls ist die Bestimmung des Rückgewinnungspotenzials von sekundären Materialien durch den Ausbau und Recycling für jede in dieser Studie definierten Gerätekategorie. Verlorenen Mengen an Materialien im Behandlungsprozess werden auch abgeschätzt. Die Modellierung erfolgt für das Jahr 2021.

Im dMFA-Modul, als Kern des Gesamtmodells, werden die Stoffflüsse in der Schweiz für Fahrzeuge, EEGs, Komponenten und Materialien modelliert. Mit dieser Modellierung können die Mengen jedes Gerätetyps abgeschätzt werden, welche im Jahr 2021 in Schweizer E-Schrott-Recyclinganlagen verwertet werden könnten, wenn sie systematisch aus den Autos ausgebaut werden würden. Im Materialverwertungsmodul wird diese getrennte EEG-Behandlung simuliert.

Im Materialverwertungsmodul wird die Verwertungskette für Elektroschrott basierend auf einer schweizerischen Fallstudie modelliert. Es ist so aufgebaut, dass es leicht angepasst werden kann, um zukünftige Recyclingtechnologien oder alternative Recyclingprozessketten zu integrieren. Die Ergebnisse des Materialverwertungsmoduls ermöglichen zudem die Berechnung des Umweltnutzens des Ausbaus und dem separaten EEG Recyclings im Ökobilanzmodul oder die Bestimmung des Recyclingpotenzials bestimmter EEG in der Zukunft.

2 Methodik

2.1 Ansatz

Im Materialverwertungsmodul wird die folgende Frage, für den Referenzjahr 2021 beantwortet:

- Welche Massen an bestimmten Elementen oder Materialien oder können aus ausgebauten und separat rezyklierten EEG zurückgewonnen werden?

Das Schweizer System für das Recycling von Elektroschrott beinhaltet die folgenden Prozessschritte:

1. Sammlung von Elektroschrott an Rückgabestellen und Transport zu Zerlegebetriebe
2. Händische Behandlung (Zerlegung) sowie Schadstoffentfrachtung (beispielsweise das Entfernen von grösseren Kondensatoren oder quecksilberhaltigen Lampen)
3. Transport des schadstoffentfrachteten Materials zu einer mechanischen Behandlung in einer Recyclinganlage
4. Mechanische Behandlung mittels Zerkleinerungs- und Trenntechnologien und Erzeugung von Output-Fractionen (Primäre Trennung)
5. (bei Bedarf) Transport von Output-Fractionen zur weiteren Behandlung bei einem Folgebehandler
6. (bei Bedarf) Weitere Behandlung von Mischfractionen durch Folgebehandler (sekundäre Trennung)
7. Transport von Fractionen in eine Rückgewinnungsanlage (z.B. Schmelzofen)
8. Gewinnung von sekundären Rohstoffen

Im Materialverwertungsmodul werden die Massenflüsse vom Ausbau der EEG bis zur Rückgewinnung sekundärer Materialien (Schritt 8) modelliert. Die Modellierung der Schritte 1 – 4 basiert auf den Resultaten eines Batchversuchs, welcher im Rahmen von EVA II bei der Solenthaler Recycling AG durchgeführt wurde [12]. Für die Modellierung der Prozessschritte 5 – 8 wurden Daten aus wissenschaftlichen Publikationen und Veröffentlichungen der Industrie [5], [16]–[24] sowie Informationen aus Expertenbefragungen verwendet [25]. Die Ergebnisse aus dem Versuch wurden vor der Anwendung im Modul aggregiert und damit anonymisiert.

Die in der Modellierung berücksichtigten Elemente und Materialien sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Metalle Nd und Dy werden im heutigen Recyclingsystem nicht zurückgewonnen.

Tabelle 4: In der Modellierung berücksichtigten Elemente und Materialien

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

In Tabelle 1 sind die Gerätekategorien dargestellt, welche in im Modul modelliert wurden. Die Gerätetypen innerhalb einer Gerätekategorie besitzen vergleichbare Bestandteile, einen ähnlichen Aufbau und daher eine ähnliche stoffliche Zusammensetzung. Daher verhalten sich die Geräte innerhalb einer Gerätekategorie bei der Behandlung in einer Elektroschrott-Recyclinganlage weitgehend ähnlich.

Die untersuchten Gerätekategorien unterscheiden sich allerdings deutlich in ihrem Aufbau. In der Behandlung in einer Elektroschrott-Recyclinganlage generieren sie verschiedene Fraktionen, welche unterschiedliche Rückgewinnungspotenziale aufweisen. Aus diesem Grund werden die Gerätekategorien im Modul unterschiedlich modelliert. Die Gerätetypen innerhalb einer Gerätekategorie sind im Modul gleich modelliert.

Das Materialverwertungsmodul entspricht weitgehend dem Prozess 17 des Gesamtmodells (siehe Abbildung 3). Alle Teilprozesse des Materialverwertungsmoduls sind von 20 bis 31 durchnummeriert (siehe Abbildung 4). Einige Schritte (wie z.B. der Transport) sind in der Struktur des Materialverwertungsmoduls abgebildet, auch wenn sie keinen Einfluss auf die Massenströme haben. Diese sind im Ökobilanzmodul [11] relevant oder dienen der funktionalen Darstellung des Recyclingsystems.

2.2 Struktur des Materialverwertungsmoduls

Der Aufbau des Materialverwertungsmoduls ist in Abbildung 4 dargestellt. Es enthält folgende Teile:

2.2.1 Inputmaterial

Die EEG werden aus den Altfahrzeugen ausgebaut (siehe Prozess 5 im Gesamtmodell, Abbildung 3) und anschliessend in eine der vier möglichen Gerätekategorien eingeteilt.

2.2.2 Händische Behandlung

Dieser Behandlungsschritt ist durch den Prozess 20 des Materialverwertungsmoduls dargestellt. In diesem Schritt wird nur die Entfernung der quecksilberhaltigen Lampen aus den Scheinwerfern

berücksichtigt. Der Massenanteil der quecksilberhaltigen Lampen ist im Vergleich zur Gesamtmasse des Scheinwerfers sehr gering. Die Masse dieser Fraktion wird daher in der Berechnung im Materialverwertungsmodul vernachlässigt. Quecksilber ist ein besonders gefährlicher Schadstoff. Die Schadstoffentfrachtung der Scheinwerfer ist daher ein wichtiger Schritt in der Behandlung der EEG, weshalb er in Abbildung 4 miteinbezogen ist.

2.2.3 Mechanische Behandlung

Dieser Behandlungsschritt wird durch den Prozess 21 des Materialverwertungsmoduls dargestellt. Mit diesem Schritt wird die Zerkleinerung von EEG in einer Elektroschrott-Recyclinganlage durch Trennung einer gegebenen Inputmasse in Output-Fractionen modelliert (siehe dazu Tabelle 5). Jede Fraktion setzt sich aus bestimmten Materialien zusammen (verschiedene Metalle, verschiedene Kunststoffe und der Rest, wie in Abbildung 4 aufgeführt). Bei diesem Behandlungsschritt entsteht ebenfalls eine RESH Fraktion.

Die Massenanteile der Materialien und Elemente in jeder Fraktion der mechanischen Behandlung (Primärfractionen) sowie die Verteilung der Inputmasse auf diese verschiedenen Primärfractionen unterscheiden sich je nach Gerätekategorie. Die Werte der beiden Parameter der Massenanteile sowie der Verteilung wurden für jede Kategorie durch den Batchversuch bestimmt. Im Falle der Kategorie "Kabel" wurden technische Daten aus der Kabelverwertung verwendet. Alle Parameter sind in Tabelle 11 präsentiert.

Die Datenquellen für die Bestimmung der Massenanteile der Materialien in den Fraktionen sind in Abbildung 4 dargestellt.

Tabelle 5: Datenquellen der Massenanteile der enthaltenen Materialien

Datenquelle	Element/ Material	Fraktion	Erläuterungen
Batchtest	Fe	Leiterplatten Kunststoffe	Die chemische Analyse der Leiterplatten sowie der Kunststofffraktion nach der mechanischen Auftrennung aus dem Batchtest liefert robuste Daten betreffend den Massenanteilen an Edelmetallen in EEG in diesen beiden Fraktionen. Es wird angenommen, dass die Edelmetalle sich in diesen beiden Fraktionen aufkonzentrieren.
	Al		
	Cu		
	Ag		
	Au		
	Pd		
Swico	Fe	Eisen	Für die reinen Eisen- wie Aluminiumfraktionen wie für die Mischfraktion wie "Fe/Cu" wurden für die Bestimmung der Massenanteile Daten von Swico ³ zu Hilfe genommen. Die Zusammensetzung dieser Fraktionen aus EEG wird auf Grund der ähnlichen Auftrennung während einer mechanischen Verarbeitung von Swico Elektronikschrott als vergleichbar eingeschätzt.
	Al	Aluminium	
	Cu	Fe/Cu	

³ Wirtschaftsverband der ICT- und Online-Branche

Deep Dismantling	PC-ABS PP ABS PMMA	Kunststoffe	In einem "Deep Dismantling"-Versuch (Tiefzerlegung) wurden von Hand mehrere Dutzend Geräte in Komponenten zerlegt und die Bestandteile gewogen, um die Massenanteile zu bestimmen. Der Durchschnittsanteil der verschiedenen Kunststoffarten aller Geräte einer Gerätekategorie wurde als Datengrundlage für die Modellierung verwendet.
Extrapolierung/ Hypothese	Fe Al Cu Ag Au Pd	Leicht- magnetisch Gemischte Metalle	Für die Fraktionen "Leichtmagnetisch" sowie "gemischte Metalle" lagen Daten aus dem Batchversuch vor. Für die Kategorie Scheinwerfer wurden mit den Zusammensetzungsdaten der anderen Kategorien ergänzt.

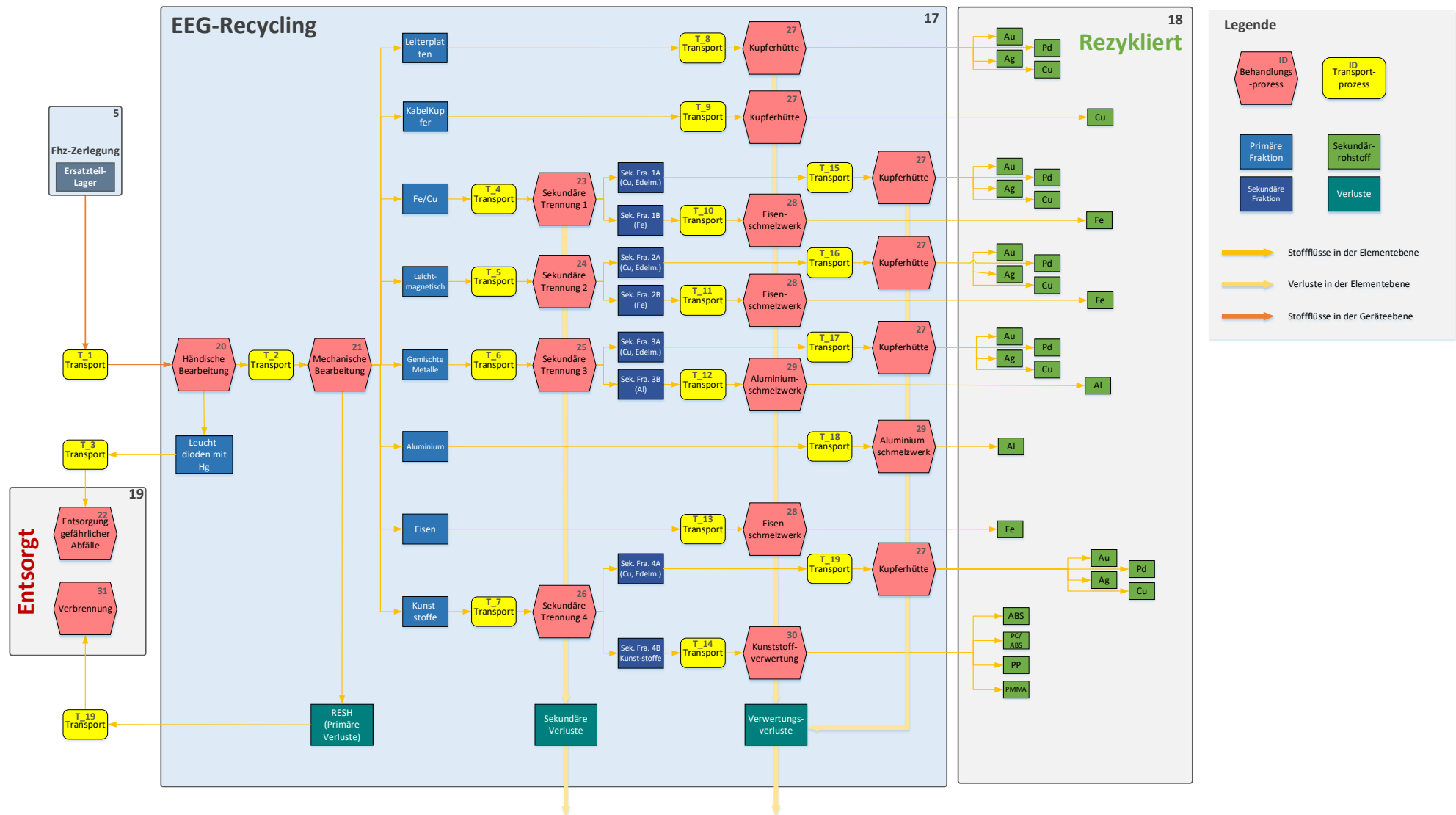


Abbildung 4: Aufbau des Materialverwertungsmoduls

Tabelle 6: Massenanteile der primären Fraktionen sowie der Elemente und Materialien jeder Gerätekategorie

		Massenanteil jeder Primären Fraktion pro Gerätekategorie %	Massenanteil enthaltener Materialien										Rest %
			Fe %	Al %	Cu %	Ag ppm	Au ppm	Pd ppm	PP %	PMMA %	ABS %	PC/ABS %	
Primäre Fraktionen jeder Gerätekategorie	Scheinwerfer	Leiterplatten	9.7%	0.0%	2.2%	4.0%	136	19	4				93.7%
		Fe/Cu	0.2%	70%		25%							5%
		Leichtmagnetisch	2.8%	74.5%	1.8%	5.7%	140	18	3				18.0%
		Gemischte Metalle	3.4%	0.9%	63.5%	4.0%	130	10	1				31.6%
		Aluminium	6.9%		95%								5%
		Eisen	5.2%	100.0%									0%
		Kunststoffe	70.6%	0.4%	2.6%	6.1%	157	27	5	2.7%	29.1%	20.9%	20.0%
		Kabelkupfer											100%
		RESH (Verluste)	1.1%										100%
	Aktuator	Leiterplatten	6.4%	0.1%	1.5%	2.5%	278	56	8				95.9%
		Fe/Cu	3.6%	70.0%		25.0%	0	0	0				5%
		Leichtmagnetisch	6.1%	74.5%	1.8%	5.7%	140	18	3				18.0%
		Gemischte Metalle	11.3%	0.9%	63.5%	4.0%	130	10	1				31.6%
		Aluminium	14.8%		95.0%		0	0	0				5%
		Eisen	19.2%	100.0%			0	0	0				0%
		Kunststoffe	37.4%	1.1%	6.1%	1.7%	21	2	0	2.7%	0%	20.9%	49.2%
		Kabelkupfer											100%
		RESH (Verluste)	1.2%										100%
	Steuergerät	Leiterplatten	14.2%	0.2%	1.1%	7.4%	298	150	38				91.3%
		Fe/Cu	3.2%	70%		25%							5%
		Leichtmagnetisch	8.0%	74.5%	1.8%	5.7%	140	18	3				18.0%
		Gemischte Metalle	5.9%	0.9%	63.5%	4.0%	130	10	1				31.6%
		Aluminium	16.1%		95%								5%
		Eisen	32.0%	100%									0%
		Kunststoffe	19.3%	1.0%	6.6%	2.6%	166	84	1	2.7%	0%	20.7%	48.5%
		Kabelkupfer											100%
		RESH (Verluste)	1.3%										100%
	Kabel	Leiterplatten											100%
		Fe/Cu											100%
		Leichtmagnetisch											100%
		Gemischte Metalle											100%
		Aluminium											100%
		Eisen											100%
		Kunststoffe	48.8%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
		Kabelkupfer	50.0%			75%							25%
		RESH (Verluste)	1.2%										100%

Datenquelle

Batchtest EVA II

Reptool (SWICO)

Gerechnet

Extrapolierung/Hypothese

Deep Dismantling EVA II

2.2.4 Sekundäre Trennung

Einige Output-Fractionen (im Modell: Fe/Cu, Leichtmagnetisch, gemischte Metalle und Kunststoffe) werden einer Folgebehandlung (sekundäre Trennung) unterzogen. Dies ermöglicht eine bessere Trennung und sauberere Fraktionen, was die Rückgewinnung aus diesen Fraktionen ermöglicht. Die Folgebehandlung der Mischfraktionen ist in der Modellierung in den Prozessen 23 bis 26 dargestellt. Jede sekundäre Trennung wird durch die Umwandlung einer primären Output-Fraktion in zwei sekundäre Output-Fractionen (A und B) und eine Abfallfraktion (Verluste) modelliert. Tabelle 6 zeigt die Verteilung der sekundären Trennung für jedes Material, welches in der primären mechanischen Behandlung enthalten ist. Jedes Material und jedes Element, das in der

primären Output-Fraktion enthalten ist, wird auf die sekundären Output-Fractionen A, B und Verluste verteilt. Addiert man die Massen aller Elemente und Materialien, die in den sekundären Output-Fractionen vorkommen, kann man die Gesamtmasse der Fraktion berechnen. Die Aufteilung der Elemente und Materialien in der sekundären Trennung wurden basierend auf technischen Daten zur Folgebehandlung von Elektroschrott in der Schweiz gewählt.

Tabelle 7: Aufteilung der Elemente und Materialien von primären Fraktionen zu sekundären Fraktionen durch sekundäre Trennung.

		Transferkoeffizienten		
		Sekundäre Fraktion		
		A	B	Verluste
Prozess 23 - Sekundäre Trennung	Fe	0%	90%	10%
	Al	0%	0%	100%
	Cu	60%	0%	40%
	Au	0%	0%	100%
	Ag	0%	0%	100%
	Pd	0%	0%	100%
	Nd	0%	100%	0%
	Dy	0%	100%	0%
	PP	0%	0%	100%
	PMMA	0%	0%	100%
	ABS	0%	0%	100%
	PC/ABS	0%	0%	100%
Prozess 24 - Sekundäre Trennung	Fe	0%	100%	0%
	Al	0%	0%	100%
	Cu	100%	0%	0%
	Au	0%	0%	100%
	Ag	0%	0%	100%
	Pd	0%	0%	100%
	Nd	0%	100%	0%
	Dy	0%	100%	0%
	PP	0%	0%	100%
	PMMA	0%	0%	100%
	ABS	0%	0%	100%
	PC/ABS	0%	0%	100%
Prozess 25 - Sekundäre Trennung	Fe	0%	0%	100%
	Al	0%	100%	0%
	Cu	100%	0%	0%
	Au	100%	0%	0%
	Ag	100%	0%	0%
	Pd	100%	0%	0%
	Nd	0%	0%	100%
	Dy	0%	0%	100%
	PP	0%	0%	100%
	PMMA	0%	0%	100%
	ABS	0%	0%	100%
	PC/ABS	0%	0%	100%
Prozess 26 - Sekundäre Trennung	Fe	100%	0%	0%
	Al	100%	0%	0%
	Cu	100%	0%	0%
	Au	100%	0%	0%
	Ag	100%	0%	0%
	Pd	100%	0%	0%
	Nd	100%	0%	0%
	Dy	100%	0%	0%
	PP	0%	95%	5%
	PMMA	0%	98%	2%
	ABS	0%	90%	10%
	PC/ABS	0%	95%	5%
	Rest	0%	0%	100%

Datenquelle

Reptool (SWICO)

Extrapolierung/Hypothese

2.2.5 Materialverwertung

Die sekundären Output-Fractionen und die verbleibenden primären Output-Fractionen (die keinen sekundären Sortierprozess durchlaufen haben) werden zu Behandlungsanlagen transportiert.

tiert, um Sekundärrohstoffe zurückzugewinnen. Diese können wieder in neuen Produkten eingesetzt werden. Dieser letzte Behandlungsschritt wird im Materialverwertungsmodul durch die Prozesse 27 bis 30 abgebildet. Die Sekundärrohstoffe werden als Outputs des gesamten Systems modelliert, die nur ein Element oder Material enthalten. Jeder Materialverwertungsprozess wird modelliert, indem jedes Material des Eingangsflusses in einen Abfallfluss - erzeugt durch die Behandlungsverluste - und einen "wiedergewonnenen" Sekundärrohstofffluss aufgeteilt wird. Der letztgenannte Materialfluss gilt als verwertet und ist in der Lage, die Primärproduktion des betreffenden Materials zu ersetzen.

Die Aufteilung der Elemente und Materialien in den Rückgewinnungsprozessen wurden basierend auf technischen Daten zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus Elektroschrott in der Schweiz gewählt.

Tabelle 8: Verteilung der Elemente und Materialien von primären und sekundären Fraktionen in sekundäre Rohstoffe durch verschiedene Rückgewinnungsprozesse

		Transferkoeffizienten	
		Sekundärrohstoff	Verluste
Prozess 27 - Materialverwertung Kupferhütte	Fe	0%	100%
	Al	0%	100%
	Cu	100%	0%
	Au	95%	5%
	Ag	95%	5%
	Pd	95%	5%
	Nd	0%	100%
	Dy	0%	100%
	PP	0%	100%
	PMMA	0%	100%
	ABS	0%	100%
	PC/ABS	0%	100%
	Rest	0%	100%
Prozess 28 - Sekundäre Trennung Eisenschmelzwerk	Fe	97%	3%
	Al	0%	100%
	Cu	0%	100%
	Au	0%	100%
	Ag	0%	100%
	Pd	0%	100%
	Nd	0%	100%
	Dy	0%	100%
	PP	0%	100%
	PMMA	0%	100%
	ABS	0%	100%
	PC/ABS	0%	100%
	Rest	0%	100%
Prozess 29 - Sekundäre Trennung Aluminiumschmelzwerk	Fe	0%	100%
	Al	95%	5%
	Cu	0%	100%
	Au	0%	100%
	Ag	0%	100%
	Pd	0%	100%
	Nd	0%	100%
	Dy	0%	100%
	PP	0%	100%
	PMMA	0%	100%
	ABS	0%	100%
	PC/ABS	0%	100%
	Rest	0%	100%
Prozess 30 - Sekundäre Trennung Kunststoffverwertung	Fe	0%	100%
	Al	0%	100%
	Cu	0%	100%
	Au	0%	100%
	Ag	0%	100%
	Pd	0%	100%
	Nd	0%	100%
	Dy	0%	100%
	PP	100%	0%
	PMMA	100%	0%
	ABS	100%	0%
	PC/ABS	100%	0%
	Rest	0%	100%

Datenquelle

Reptool (SWICO)

Extrapolierung/Hypothese

2.3 Mathematische Modellierung

Alle im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Materialflüsse und ihre Zusammensetzungen werden anhand einer mathematischen Modellierung berechnet. In diesem Kapitel werden die Formeln dargestellt.

2.3.1 Notationen

Die folgenden Notationen bezeichnen verschiedene Arten von Grössen und Variablen in der Modellierung.

Tabelle 9 Notation für Grössen und Modellvariablen.

Symbol	Grössen und Modellvariablen	Einheit
M	Massenstrom oder Massenbestand	kg/Jahr oder kg
w	Massenanteil	kg/kg
k_{h-i-j}	Transferkoeffizient: Anteil des Massenstroms von Prozess h zu Prozess i, der zu Prozess j geht	-

Tabelle 10 Notation für Aspekte und Dimensionen.

Symbol	Aspekt oder Dimension	Mögliche Werte
i	Prozess Mechanische Behandlung	{21}
j	Prozesse Sekundäre Trennung und Materialverwertung	{23,..., 30}
o	Prozesse Sekundäre Trennung	{23,..., 26}
p	Prozesse Mechanische Bearbeitung und sekundäre Trennung	{21, 23,..., 26}
q	Prozesse Materialverwertung	{27,..., 30}
t	Zeit	{1950, ..., 2060}
d	Gerätetyp	Siehe Geräteliste im ANHANG A
b	Geräteklasse bzw. Behandlung	{Scheinwerfer, Aktuator, Steuergerät, Kabel}
e	Element oder Material	{Fe, Al, Cu, Au, Ag, Pd, Nd, Dy, PP, PMMA, ABS, PC/ABS, Rest}

Tabelle 10 beschreibt die unterschiedlichen Ebenen der Rechenschritte im Modell. So sind bestimmte Grössen und Prozesse auf der Modellebene des Fahrzeugs, während sich andere auf einer tieferen Ebene befinden. Siehe dazu auch Abbildung 5.

Tabelle 11: 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 Geräteebene, zwischen Ausbau und weiteren Auftrennung.
par	Bestandteile	Ein Bestandteil eines EEG, wie beispielsweise ein Elektromotor. Hauptentität in der Bestandteilebene, nach der Auftrennung in Fraktionen bis zum finalen Rückgewinnungsprozess
el	Element	In Bestandteilen enthaltene elementare Fraktion, wie beispielsweise Kupfer. Hauptentität beim finalen Rückgewinnungsprozess

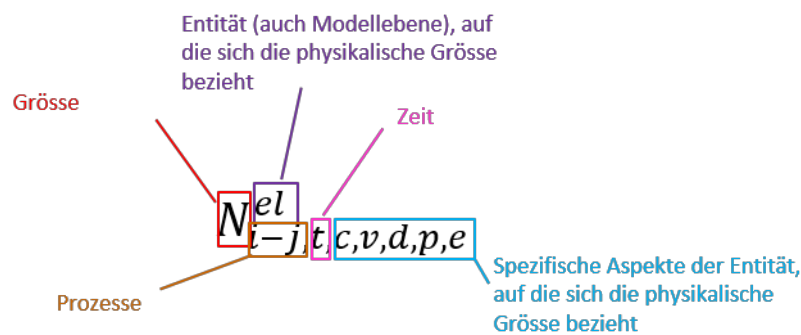


Abbildung 5: Struktur der für physikalische Grössen im mathematischen Modell verwendeten Notation.

2.3.2 Definitionen der Inputparameter

Die für das Materialverwertungsmodul verwendeten Inputparameter sind in Tabelle 11 beschrieben. Es gibt zwei Arten von Inputparametern:

- **Endogene Parameter** stammen aus Ergebnissen des Gesamtmodells und fließen ins Materialverwertungsmodul ein. Diese Konfiguration ermöglicht es, Daten aus alternativen Szenarien oder Prognosen, die für das Gesamtmodell ausgearbeitet wurden, direkt in das Materialverwertungsmodul einzubinden.
- **Exogene Parameter** werden nur für das Materialverwertungsmodul benötigt, nicht aber für den Rest des Modells. Als solche werden sie speziell erfasst und direkt in das Modul integriert.

Tabelle 12: Parameter der Modellierung

ID	Parameter	Notation	Einheit	Typ	Datenquelle
P1	Massenverteilung des Eingangsflusses in primäre Fraktionen durch mechanische Bearbeitung jeder Gerätekategorie	$w_{b,i-j}^{el}$	-	Exogen	Siehe Tabelle 5
P2	Massenverteilung jedes Materials oder Elements in den Primär-Fractionen jeder Gerätekategorie	$w_{b,i-j,e}^{el}$	-	Exogen	Siehe Tabelle 5
P3	Transferkoeffizienten jedes Materials oder Elements bei der Sekundären Trennung von primären zu sekundären Fraktionen	$k_{i-o-q,e}$	-	Exogen	Siehe Tabelle 6
P4	Transferkoeffizienten jedes Materials oder Elements aus Materialrückgewinnungsprozessen von primären oder sekundären Fraktionen zu sekundären Rohstoffen in der Form von reinen Elementen oder Materialien (e)	$k_{p-q-e,e}$		Exogen	Siehe Tabelle 7
P5	Gerätemassen welche separat rezykliert werden pro Kategorie und Typ im Referenzjahr	$M_{t=ref,17,d,b}^{dev}$	kg	Endogen	dMFA Modul [15]

2.3.3 Modellgleichungen

Wie oben erwähnt, wird im Materialverwertungsmodul die folgende Frage für den Referenzjahr 2021 beantwortet:

- Welche Massen an bestimmten Elementen oder Materialien oder können aus ausgebauten und separat rezyklierten EEG zurückgewonnen werden?

Mit den in Tabelle 12 dargestellten Gleichungen lässt sich diese Frage mathematisch beantworten.

Tabelle 13: Modellgleichungen des Materialverwertungsmoduls

ID	Beschreib der Variable	Gleichung
EQ1	Anteil der Masse jeder sekundärer Fraktion im Vergleich zur gesamten Recycling Inputmasse	$w_{b,o-q}^{el} = w_{b,i-o}^{el} \sum_e w_{b,i-o,e}^{el} \cdot k_{i-o-q,e}$
EQ2	Anteil der Masse jedes Elements oder Materials in einer sekundären Fraktion	$w_{b,o-q,e}^{el} = \frac{w_{b,i-o}^{el} \cdot w_{b,i-o,e}^{el} \cdot k_{i-o-q,e}}{w_{b,o-q}^{el}}$
EQ3	Anteil an sekundärem Rohstoff eines jeden Elements oder Materials, welcher zurückgewonnen werden kann im Vergleich zur gesamten Recycling Inputmasse	$w_{b,q-e,e}^{el} = k_{p-q-e,e} \cdot \sum_p w_{b,p-q,e}^{el}$
EQ4	Masse an sekundärem Rohstoff eines jeden Elements oder Materials, welche zurückgewonnen werden kann pro Gerätetyp und Kategorie	$M_{t=ref,17,d,q,e}^{el} = M_{t=ref,17,d,b}^{dev} \cdot w_{b,q-e,e}^{el}$

3 Ergebnisse

3.1 Zurückgewonnene Materialien durch separates EEG-Recycling

Abbildungen 6 - 9 zeigen die Massenflüsse der Materialmengen für die vier Gerätekategorien für eine Menge von 100 kg Inputmaterial. In Abbildung 10 sind die Massenflüsse für alle Geräte in Schweizer Altfahrzeugen modelliert. Jeder Fall wird im Folgenden separat beschrieben.

3.1.1 Gerätekategorie: Aktuator

Siehe Abbildung 6. Die Auftrennung in der ersten mechanischen Behandlung führt bei der Gerätekategorie Aktuator zu einer relativ grossen Kunststofffraktion welche in eine sekundäre Trennung geht. Die Summe aller Verluste liegt bei 38%, den grössten Anteil machen dabei nicht-wiederverwendbare Kunststoffe aus. In der Rückgewinnung stellen die Industriemetalle Eisen und Aluminium massenmässig den grössten Anteil an zurückgewonnenen Materialien dar. Im Vergleich zu den anderen Gerätekategorien lassen sich beim Recycling von Aktuatoren mehr Basismetalle und weniger Edelmetalle zurückgewinnen.

3.1.2 Gerätekategorie: Steuergerät

Siehe Abbildung 7. Die Eisenfraktion nach der mechanischen Auftrennung bei Steuergeräten höher als bei den anderen Kategorien. Sie stellt bei Steuergeräten 32% der Masse dar. Ebenso ist die Leiterplatten-Fraktion bei Steuergeräten am grössten. Steuergeräte enthalten im Vergleich zu den anderen Kategorien am wenigsten Kunststoffe. In der Rückgewinnung stellen die Industriemetalle Eisen und Aluminium massenmässig den grössten Anteil an zurückgewonnenen Materialien dar. Die Summe aller Verluste liegt bei ungefähr 33%. Das Recycling von Steuergeräten ermöglicht die Rückgewinnung größerer Mengen an Edelmetallen als jede andere Gerätekategorie.

3.1.3 Gerätekategorie: Scheinwerfer

Siehe Abbildung 8. Die Kategorie Scheinwerfer enthält besonders viele Kunststoffe. Die Kunststoff-Fraktion macht nach der ersten mechanischen Bearbeitung für diese Kategorie mit über 70% der Masse den grössten Anteil aus. In der Kategorie Scheinwerfer enthält die Kunststoff-Fraktion einen erhöhten Metallanteil, welcher in der sekundären Behandlung abgetrennt wird. Die Kategorie "Scheinwerfer" enthält grosse Mengen an PMMA (auch bekannt als Plexiglas), einem hochwertigen und transparenten Kunststoff sowie Kunststoffe des Typs PC-ABS und ABS. Die Summe aller Verluste liegt bei ungefähr 32%. Es können aber auch signifikante Mengen an Edelmetallen zurückgewonnen werden.

3.1.4 Gerätekategorie: Kabel

Siehe Abbildung 9. Die Gerätekategorie "Kabel" (Abbildung 9) ist einfacher aufgebaut und besteht nur aus Kupfer und der Kunststoffummantelung, üblicherweise zum Beispiel aus Vinyl oder PVC. Im Modell wird angenommen, dass der Kunststoff der Kategorie "Kabel" für das Recycling ungeeignet ist, da er in Praxis immer verbrannt wird. Abzüglich eines geringen Verlusts in der mechanischen Bearbeitung sind die Massenanteile des Kupfers und der Kunststoffe in den primären Output-Fractionen für die Kategorie der Kabel ähnlich gross.

3.1.5 Alle Geräte in Altfahrzeugflotte

Wie in Abbildung 10 ersichtlich, generiert die mechanische Bearbeitung der EEG die grössten Anteile der Output-Fractionen "Leiterplatten", "Eisen" und "Aluminium". Die sekundäre Trennung steuert nur einen geringen zusätzlichen Anteil an separierten metallhaltigen Fractionen bei. Eine Ausnahme stellen die Scheinwerfer dar, wo durch die sekundäre Trennung der Kunststoff-Fraction eine signifikante Menge an Metallen von der Kunststoff-Fraction abgetrennt werden für die Rückgewinnung der enthaltenen Edelmetalle sowie des Kupfers in der Kupferhütte kann.

Die Stoffflussdiagramme der Abbildungen 6 bis 10 zeigen ebenfalls an welchen Prozessschritten die grössten Materialverluste entstehen: Die erste mechanische Bearbeitung ist weitgehend verlustfrei, mit Materialverlusten im Bereich 1 – 2%. Die grössten Verluste entstehen bei den Kunststoffen, welche aus Gründen der Reinheit oder stofflichen Zusammensetzung für die Rückgewinnung ungeeignet sind. Diese werden zusammen mit anderem Restmaterial thermisch in der KVA verwertet.

Die Effizienz der Rückgewinnungsprozesse ist ebenfalls unterschiedlich: So wird angenommen, dass ein Eisen- oder Aluminiumschmelzwerk hohe Rückgewinnungsquoten und dementsprechend geringe Materialverluste erreichen kann. Bei der Rückgewinnung der Edelmetalle aus Leiterplatten geht der Kunststoff im Schmelzprozess verloren, was einen signifikanten Massenfluss verursacht, jedoch kann eine hohe Effizienz in der Rückgewinnung der Edelmetalle erreicht werden.

Die STMs Neodym und Dysprosium können derzeit nicht zurückgewonnen werden. Diese Elemente sind vor allem in der Fe/Cu-Fraction zu finden, da sich die Elektromotoren dort aufkonzentrieren, und damit auch die darin enthaltenen Magnete. Geringe Konzentrationen von Nd und Dy wurden in der Leichtmagnetisch-Fraction gemessen. Es ist auch wahrscheinlich, dass diese Elemente aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften auch in die Eisenfraction gelangen.

Materialverwertungsmodul Recycling 100kg EEG der Kategorie "Aktuator"

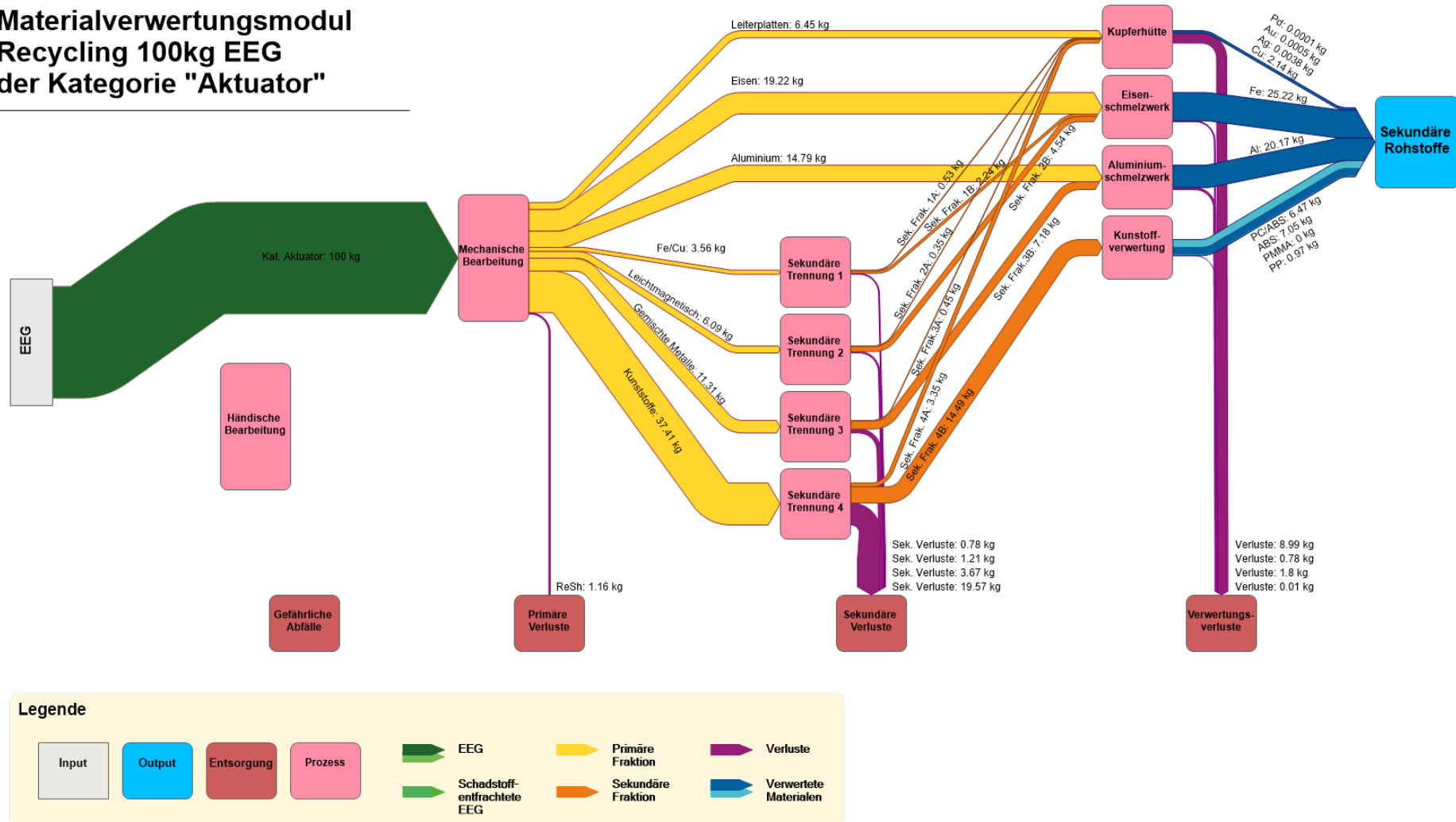


Abbildung 6: Sankey 100 kg EEG der Kategorie "Aktuator"

Materialverwertungsmodul Recycling 100kg EEG der Kategorie "Steuergerät"

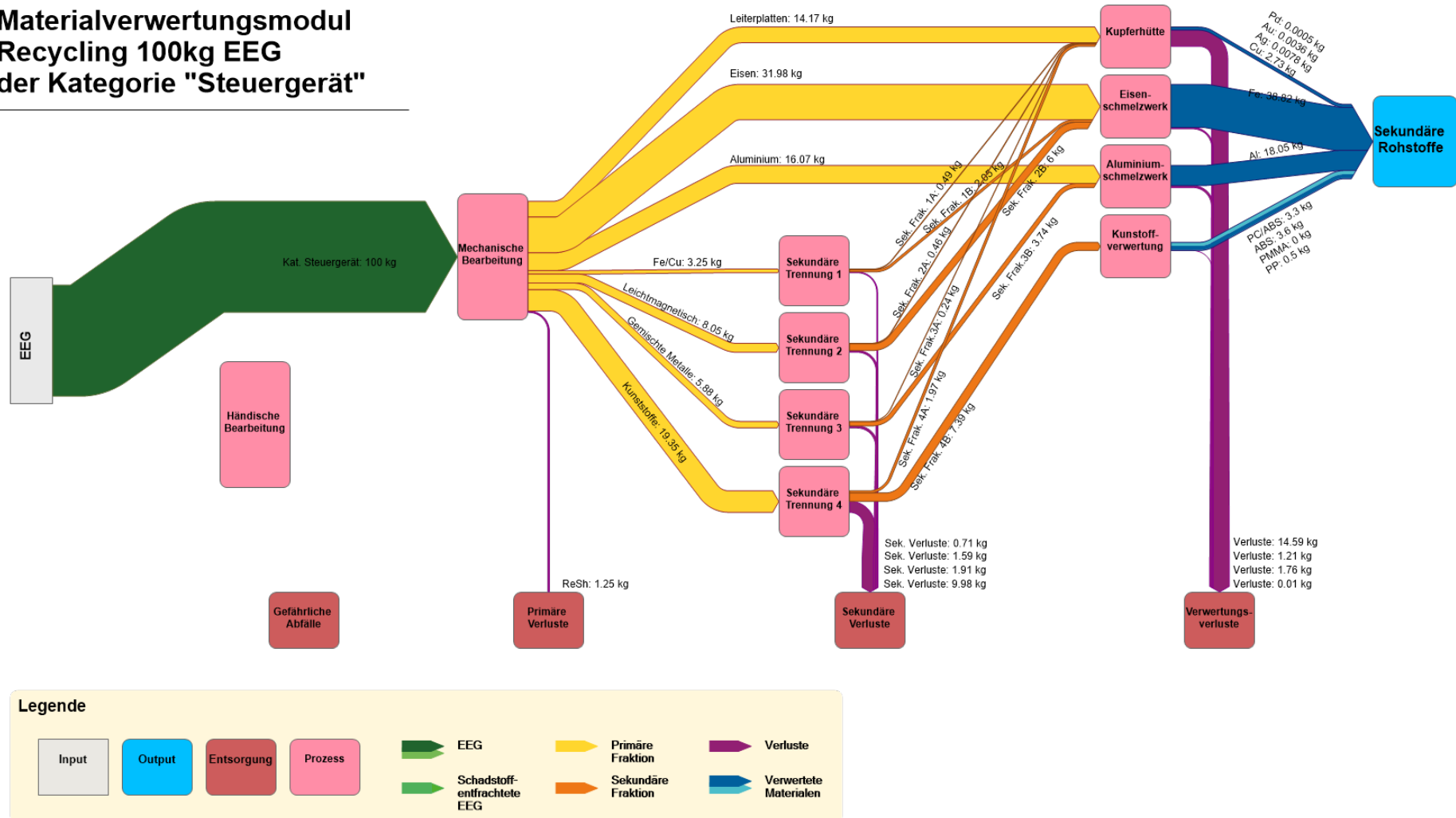


Abbildung 7: Sankey 100 kg EEG der Kategorie "Steuergerät"

Materialverwertungsmodul Recycling 100kg EEG der Kategorie "Scheinwerfer"

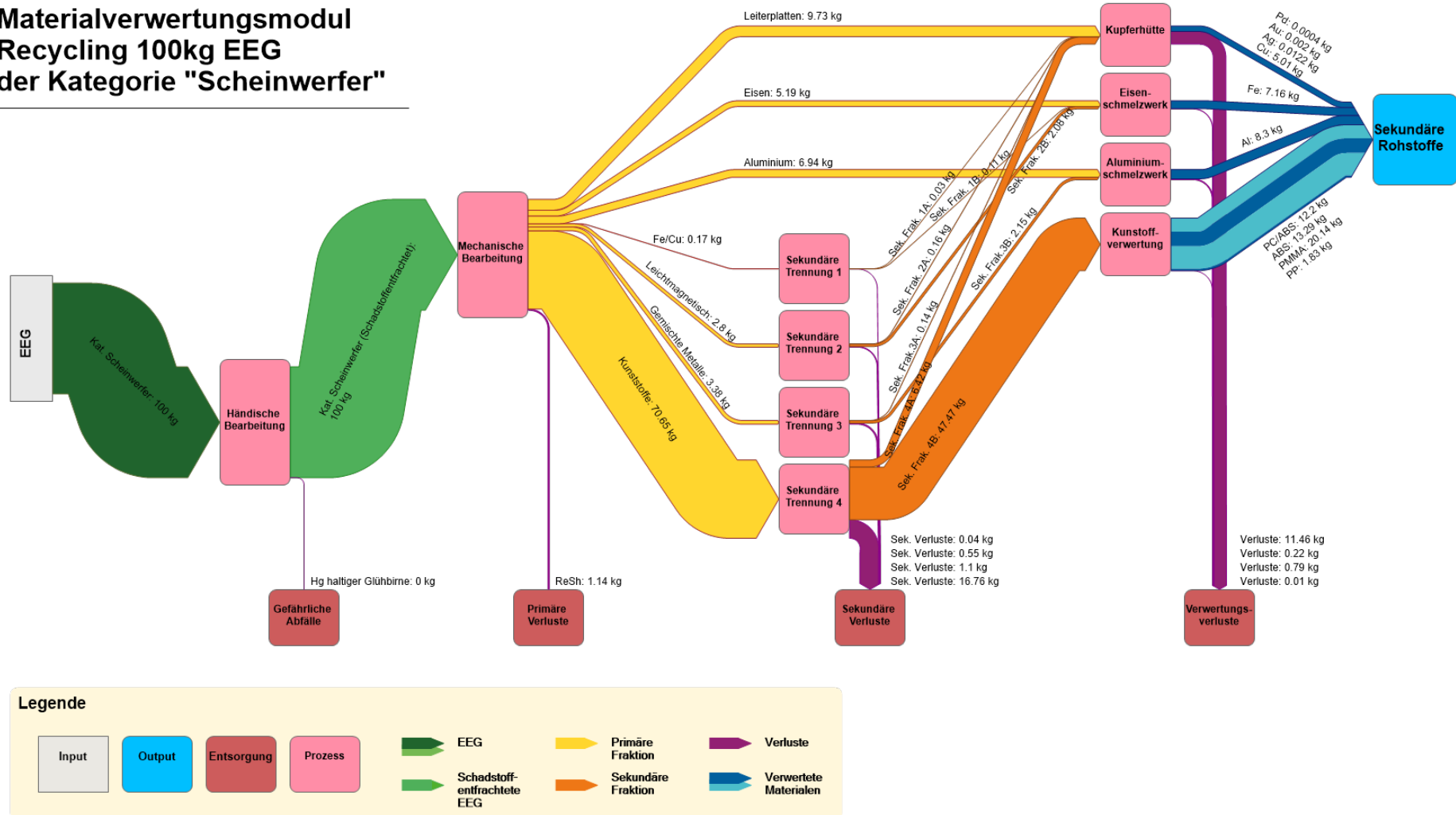


Abbildung 8: Sankey 100 kg EEG der Kategorie "Scheinwerfer"

Materialverwertungsmodul Recycling 100kg EEG der Kategorie "Kabel"

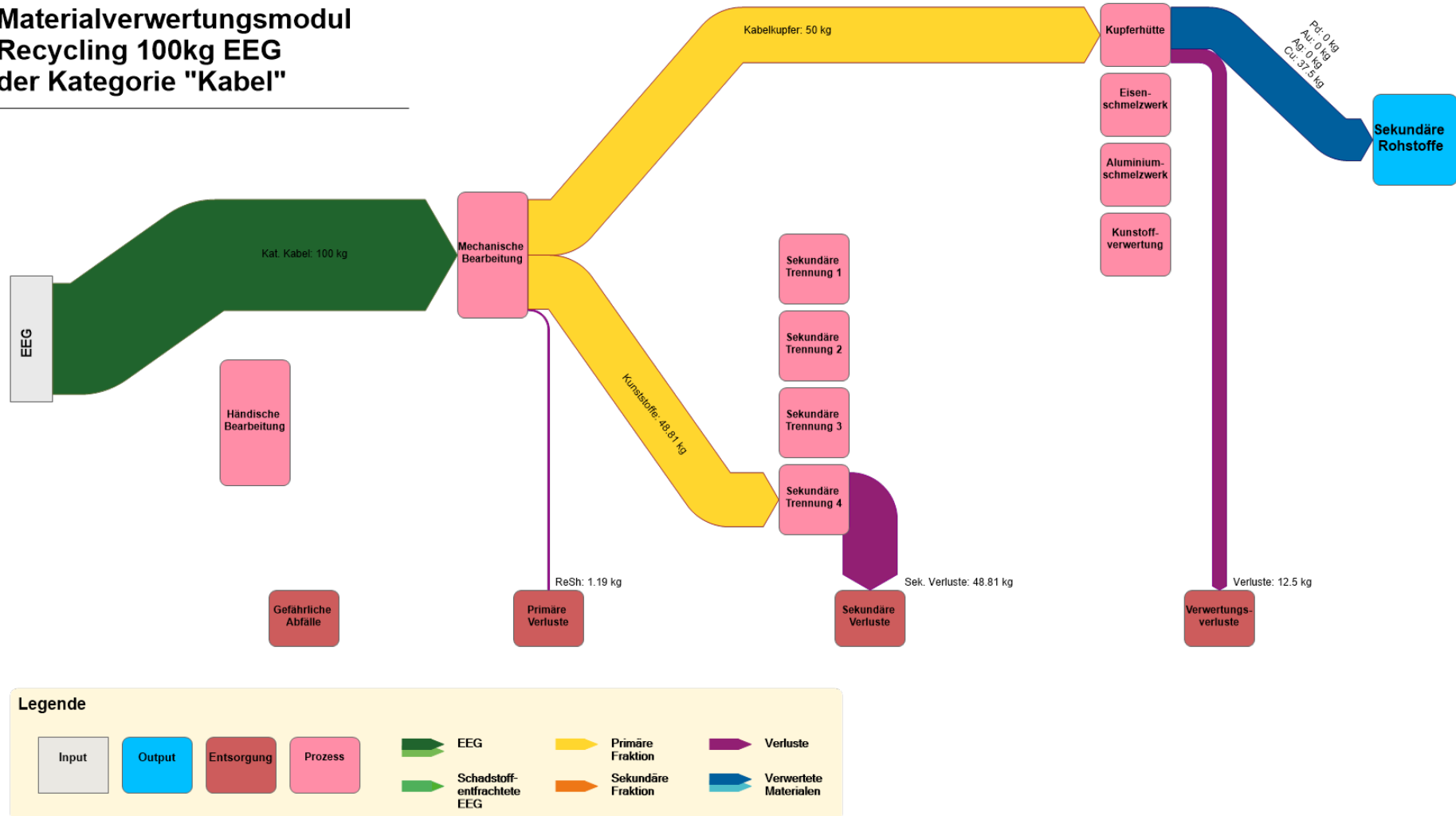


Abbildung 9: Sankey 100 kg EEG der Kategorie "Kabel"

Materialverwertungsmodul Recycling aller EEG aus alle in der Schweiz rezyklierten Alt- Fhz (2021)

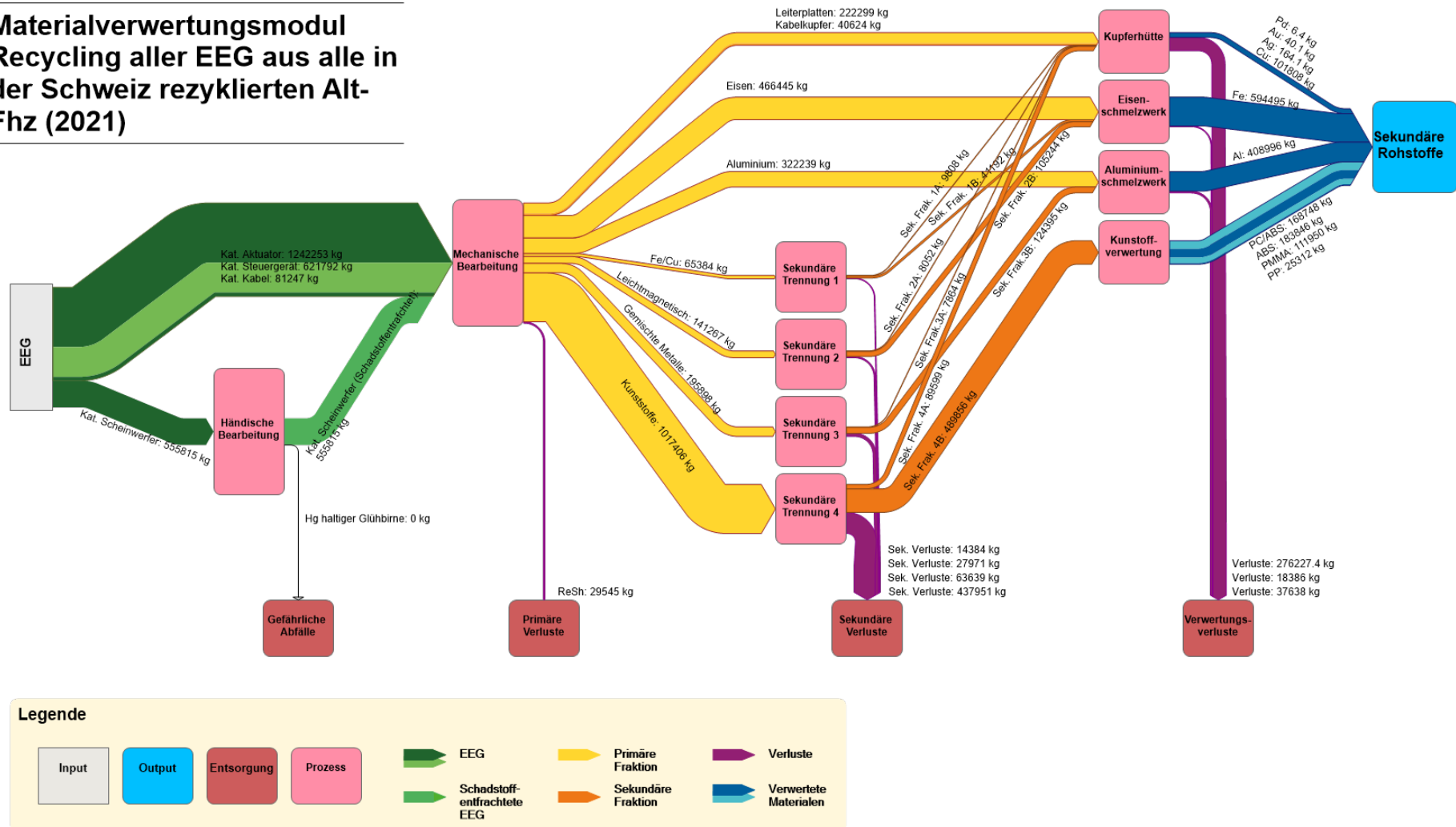


Abbildung 10: Sankey aller EEG aus in der Schweiz rezyklierten Alt-Fhz (2021)

3.2 Grenzen und mögliche Weiterentwicklungen

Es gibt verschiedene Möglichkeiten das Modul weiterzuentwickeln:

- Es könnten Fraktionszusammensetzungen auf der Ebene der Gerätetypen anstelle der Gerätekategorien eingesetzt werden. Diese bessere Auflösung würde die Modellierung verfeinern und zu differenzierteren Ergebnissen führen. Dies würde zusätzliche Versuche zur Erweiterung der Datenlage benötigen, da diese Daten zum jetzigen Zeitpunkt nicht existieren.
- Zusätzlich wäre es möglich, die Prozesskette weiter aufzuteilen und detaillierter darzustellen. Die angewandte Prozesskette basiert auf einem Beispiel eines Schweizerischen Recyclingbetriebs. Die Recyclingunternehmen verwenden jedoch unterschiedliche Zerkleinerungsprozesse und trennen Materialien auf verschiedene Arten auf.
- Weiter könnte die Modellierung auf zukünftige Rückgewinnungsprozesse für weitere Zielmaterialien oder -elemente erweitert werden, wie beispielsweise für Neodym und Dysprosium und damit die Entwicklung von neuen Recyclingtechnologien berücksichtigen. Auch könnten den jetzigen Zielkunststoffen (PC-ABS, ABS, PP, PS und PMMA) zusätzliche Kunststoffe hinzugefügt werden.
- Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit umfasst die Ergänzung der bestehenden Datengrundlage besonders für die sekundäre Trennung und Rückgewinnungsprozesse, bei welchen Informationen zu firmenspezifischen Prozessen nicht zugänglich sind. Zusätzlich könnte eine genauere Modellierung die Qualität der zurückgewonnenen Sekundärmaterialien miteinbeziehen. Dies ist besonders für Metalle wie Aluminium sehr relevant, da die Qualität den möglichen Verwendungszweck bestimmt. Dies beeinflusst den Wert sowie den zusätzlich erzielten Umweltnutzen durch die Rückgewinnung der Sekundärmaterialien.
- Schlussendlich könnte die Modellierung von der Excel-basierten Version in eine besser angepasste Programmiersprache wie Python übertragen werden, welche ermöglicht, komplexere Analysen und Simulationen durchzuführen und eine Integration in das entwickelte dMFA-Modul erleichtern würde.

4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse des Materialverwertungsmoduls zeigen die unterschiedliche Auftrennung der vier betrachteten Gerätekategorien in der Verwertung in einer auf Elektroschrott spezialisierten Recyclinganlage, welche dem Stand der Technik im Schweizer Elektrorecyclingsystem entspricht.

Die Materialflüsse, -verluste, sowie -rückgewinnungspotenziale sind durch die Modellierung der Stoffflüsse für die im Modul berücksichtigten Elemente und Materialien dargestellt. Die Ergebnisse bilden eine Grundlage für die Beurteilung der ökologischen wie ökonomischen Aspekte für das separate EEG Recycling. Das Modul stellt eine Vereinfachung der Realität dar. Allerdings wurden mit den Batchversuchen besonders für die primäre Auftrennung der EEG empirische Grundlagen geschaffen, welche nötig sind, um relevante und realistische Ergebnisse zu erzeugen.

Die Industriemetalle Eisen, Aluminium und Kupfer für alle Gerätekategorien bereits sehr gut in einer ersten mechanischen Behandlung in Fraktionen aufgetrennt. Mischfraktionen wie die "Fe/Cu"-, "Gemischte Metalle", und "Leichtmagnetisch" Fraktionen stellen für alle Kategorien eine geringe Masse dar, mit Ausnahme der "Kunststoffe"-Fraktion. Die Auftrennung der Gerätekategorien in die verschiedenen Fraktionen ist allerdings durch die verwendete Technik der Recyclinganlage beeinflusst. Diese Studie basiert auf den Ergebnissen einer bestimmten Anlage, nicht des Schweizer Durchschnitts.

Weiter zeigen die Massenanteile, dass die in der Studie berücksichtigten STM – die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium – hauptsächlich in der Fraktion "Leiterplatten" sowie der Kunststofffraktion enthalten sind. Effiziente Auftrennungsprozesse dieser Fraktionen führen zu den geringsten Verlusten und das Rückgewinnungspotenzial der STM wird maximal ausgeschöpft.

Die Modellierung der EEG auf Ebene der Gerätekategorien im Schweizer Elektroschrott-Recyclingsystem zeigt das Rückgewinnungspotenzial für die verschiedenen ausgewählten Elemente und Materialien. Wenn Rückgewinnungstechnologien für Seltene Erdelemente wie Neodym (Nd) und Dysprosium (Dy) verfügbar sind, können in Zukunft weitere Materialien wie auch Prozesse hinzugefügt werden.

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, liegen die Grenzen des präsentierten Modells darin, dass dieses auf einem einzelnen theoretischen Beispiel einer Recycling-Verarbeitungskette aufbaut. Für eine repräsentativere Betrachtung auf gesamtschweizerischer Ebene müssten als Grundlage eines Modells durchschnittliche Verarbeitungsketten bestimmt werden. Zusätzlich wird die Fraktionszusammensetzung im präsentierten Modell über die Gerätekategorien definiert. Die Modellierung auf Gerätetyp-Ebene würde eine feinere Aufteilung ermöglichen.

5 Referenzen




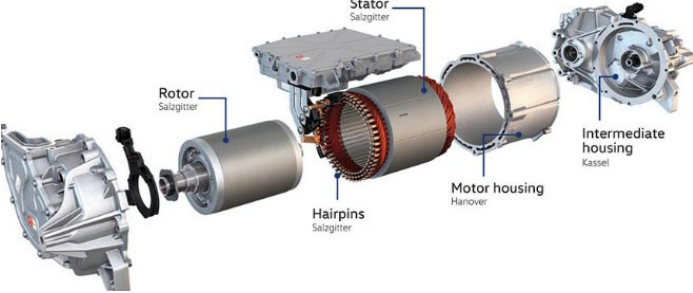

- [1] P. Wäger, R. Widmer, and A. Stamp, 'Scarce technology metals - applications, criticalities and intervention options', Federal Office of the Environment, Bern, Official report, Sep. 2011. [Online]. Available: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/fachinformationen/scarce_technologymetals-applicationscriticalitiesandintervention.pdf.download.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 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] F. Blaser, R. Widmer, and P. Wäger, 'Verwertung seltener Metalle aus der Automobilelektronik in der Schweiz: Systemübersicht und Probenahmekonzept', Empa, St. Gallen, Schweiz, Feb. 2012.
- [17] M. Andersson, M. Ljunggren Söderman, and B. A. Sandén, 'Are scarce metals in cars functionally recycled?', *Waste Management*, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.06.031.
- [18] M. Arnold, E. Pohjalainen, S. Steger, W. Kaerger, and J.-H. Welink, 'Economic Viability of Extracting High Value Metals from End of Life Vehicles', *Sustainability*, vol. 13, no. 4, Art. no. 4, Jan. 2021, doi: 10.3390/su13041902.
- [19] H. Böni et al., 'Projekt e-Recmet: Rückgewinnung von kritischen Metallen aus Elektronikschrott am Beispiel von Indium und Neodym - Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Schweiz, Schlussbericht, Aug. 2015.
- [20] F. Cucchiella, I. D'Adamo, P. Rosa, and S. Terzi, 'Automotive printed circuit boards recycling: an economic analysis', *Journal of Cleaner Production*, vol. 121, pp. 130–141, Mai 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.122.
- [21] F. Cucchiella, I. D'Adamo, P. Rosa, and S. Terzi, 'Scrap automotive electronics: A mini-review of current management practices', *Waste Manag Res*, vol. 34, no. 1, pp. 3–10, Jan. 2016, doi: 10.1177/0734242X15607429.
- [22] 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
- [23] 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.
- [24] H. Zhang, W. Li, and W. Chen, 'Model-based hazard analysis method on automotive programmable electronic system', in *2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, Oct. 2010, vol. 7, pp. 2658–2661. doi: 10.1109/BMEI.2010.5639860.
- [25] M. Capelli, 'Projekt EVA II Interview with Markus Stengele, Expert from E-waste recycling company (SOREC)'. Empa (not published), Oct. 2021.

Anhang A Liste der identifizierten Gerätetypen

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

ID 01 Gerätetyp Aktuatoren aktives Fahrwerk Standardbezeichnung AirSuspensionCompressorMotor Geräteklasse Aktuator	
ID 02 Gerätetyp Aktuatoren Bremsanlage (z.B. ABS, ESC) Standardbezeichnung BrakeSystemActuator Geräteklasse Aktuator	
ID 03 Gerätetyp Anlasser Standardbezeichnung StarterMotor Geräteklasse Aktuator	
ID 4 Gerätetyp Batterie Management System Standardbezeichnung BatteryManagementSystem Geräteklasse Steuergerät	

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

ID 10

Gerätetyp

Generator/Alternator

Standardbezeichnung

Alternator

Gerätekategorie

Aktuator

Quelle: <https://www.beupp.com/generator/what-is-the-difference-between-an-alternator-and-a-generator/>

ID 11

Gerätetyp

Inverter

Standardbezeichnung

Inverter

Gerätekategorie

Inverter

Quelle: <https://www.wogas.ch/spannungswandler-wechselrichter-auto-power-inverter-konverter-300w.html>

ID 12

Gerätetyp

Kombiinstrument/Info-Anzeige

Standardbezeichnung

CombinedInstrumentDisplay

Gerätekategorie

Steuergerät

Quelle: <https://www.autoteile-markt.de/shop/instrumente-tachometer>

ID 13

Gerätetyp

Kabelbaum

Standardbezeichnung

WiringHarness

Gerätekategorie

Kabelartiges Gerät

Quelle: <https://www.kurth-classics-autoparts.de/de/kabelbaume/746-motorkabelbaum-a1295406005.html>

ID 14

Gerätetyp

Kraftstoffpumpe






Standardbezeichnung

FuelPump

Gerätekategorie



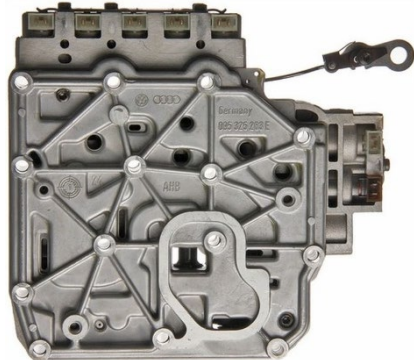

Aktuator

Quelle: <https://www.mein-autolexikon.de/motor/kraftstoffpumpe.html>

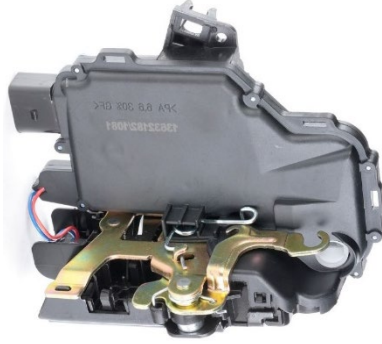




<p>ID 15</p> <p>Gerätetyp Kühlerlüftermotor</p> <p>Standardbezeichnung HeaterAndACFanMotor</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p>	 <p>Quelle: https://www.autodoc.de/tyc/7489545</p>
<p>ID 16</p> <p>Gerätetyp Lautsprecher</p> <p>Standardbezeichnung Speaker</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p>	 <p>Quelle: https://www.multipianet.ch/lautsprecher-bass/fahrzeugspezifische-systeme-lautsprecher/mercedes1586/#page=1&&specialsOnly=0</p>
<p>ID 17</p> <p>Gerätetyp On-board Ladegerät (Elektrofahrzeug)</p> <p>Standardbezeichnung BatteryCharger</p> <p>Geräteklasse 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>


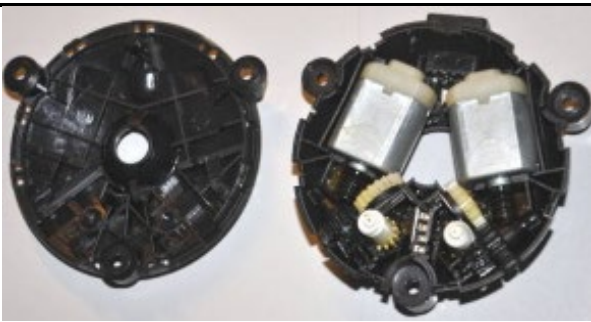

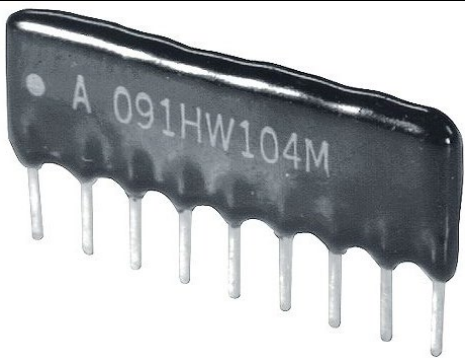

<p>ID 20</p> <p>Gerätetyp Scheinwerfer (vorne und hinten)</p> <p>Standardbezeichnung Light</p> <p>Geräteklasse Scheinwerfer</p> <p>Links: Quelle: https://www.pkwteile.de/ersatzteil/ruckleuchte Rechts: Quelle: https://www.hella.com/partnerworld/de/Produktprogramm/Fahrzeug-Beleuchtung/Hauptscheinwerfer-3214/</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>	
<p>ID 23</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Antriebsmotor</p> <p>Standardbezeichnung EngineControlUnit</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p> <p>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/</p>	
<p>ID 24</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Bordnetz/Karosserie</p> <p>Standardbezeichnung BodyControlModule</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p> <p>Quelle: https://www.glistensky.shop/index.php?main_page=product_info&products_id=207473</p>	

<p>ID 25</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Bremse und Fahrwerk (z.B. ABS, ESC)</p> <p>Standardbezeichnung BrakeSystemControlUnit SelfLevelingSuspensionController</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p> <p>Quelle: https://www.hella.com/techworld/de/Technik/Elektrik-Elektronik/ABS-ESP-Steuergeraete-fuer-Brems-und-Fahrdynamik-56049/</p>	
<p>ID 26</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Fahrassistenz</p> <p>Standardbezeichnung AdaptiveCruiseControlController ElectronicPowerSteeringController ParkAssistantController</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p> <p>Quelle: https://www.programainc.com/item_list.aspx?idcategory=38</p>	
<p>ID 27</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Fahrassistenzsensoren</p> <p>Standardbezeichnung ParkingCameraController SignRecognitionCameraController ParkingRadarController</p> <p>Geräteklasse 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 Steuergerät Infotainment (Sound-, Navi-, und Multimedia)</p> <p>Standardbezeichnung InfotainmentNavigationSystem NavigationSystem SoundSystem</p> <p>Geräteklasse 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 Steuergerät Insassenschutz (z.B. Airbagsteuerung)</p> <p>Standardbezeichnung AirbagController</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p>	
<p>Quelle: https://www.endera.de/airbagsteuergeraet-reparatur-vw-golf-iv.html</p> <p>ID 30</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Klimaautomatik</p> <p>Standardbezeichnung HabitacleClimateController</p> <p>Geräteklasse SeatHeatingController</p> <p>Geräteklasse 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-APCCBYCFBAPECBZCFCA-PBCFA-Corrado</p> <p>ID 32</p> <p>Gerätetyp Waschwasserpumpe</p> <p>Standardbezeichnung WindshieldWasherPump</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p>	

Quelle: <https://www.biltema.dk/en-dk/car---mc/car-spares/washer-equipment/washer-pumps/washer-pump-2000038246>

<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 Luftinspritzpumpe</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>	
<p>ID 40</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Start Stop</p> <p>Standardbezeichnung StartStopController</p> <p>Geräteklasse Controller</p> <p>Quelle: https://www.franceauto.pl/de_DE/p/Start-Stop-Steuergerat-Citroen-Berlingo-III-C3-II-C3-Picasso-C4-II-C4-Cactus-C4-Picasso-II-DS3-DS4-DS5-Peugeot-2008-208-3008-308-II-5008-508-Partner-III-9805721280/58524</p>	
<p>ID 41</p> <p>Gerätetyp Kondensator-Array für EV</p> <p>Standardbezeichnung CapacitorsEV</p> <p>Geräteklasse Controller</p> <p>Quelle: https://www.distrelec.ch/en/ceramic-capacitor-array-100nf-50v-20-hosonic-8c7-104m50x/p/16572366</p>	
<p>ID 42</p> <p>Gerätetyp Verteilergetriebe</p> <p>Standardbezeichnung TransferShiftActuator</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://bs-getriebetechnik.de/BMW-X3-Verteilergetriebe-generalueberholt-27103455137-27103455135-Bj-2003-2011</p>	

ID 43**Gerätetyp**

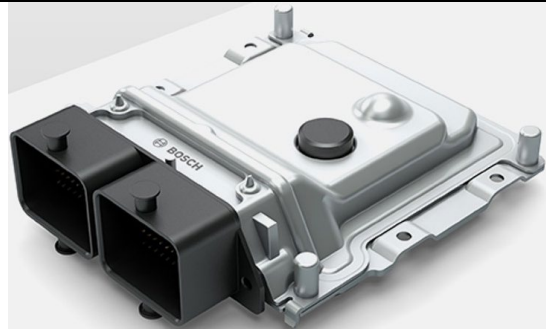
Vehicle Control Unit

Standardbezeichnung

VehicleControlUnit

Geräteklasse

Controller



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

Anhang B Liste der EEG Bestandteile

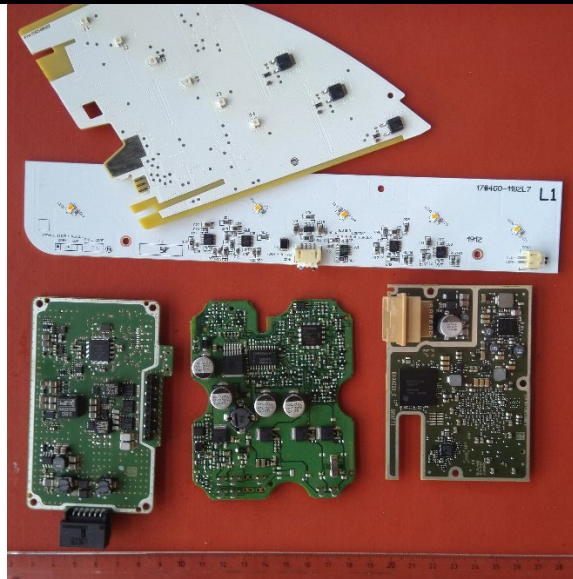
Bestandteil	Name in Datenbank	Enthalten in	Enthaltene relevante Materialien
Leiterplatte	PCB	Aktuatoren, Controller, Scheinwerfer	Edelmetalle (Gold, Silber, Platin), Kupfer, Kunststoffe
Stecker	Cables and connectors	Controller	Kunststoffe, Kupfer
Motor	Motor	Aktuatoren	Eisen, Kupfer, Neodym
Bildschirm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

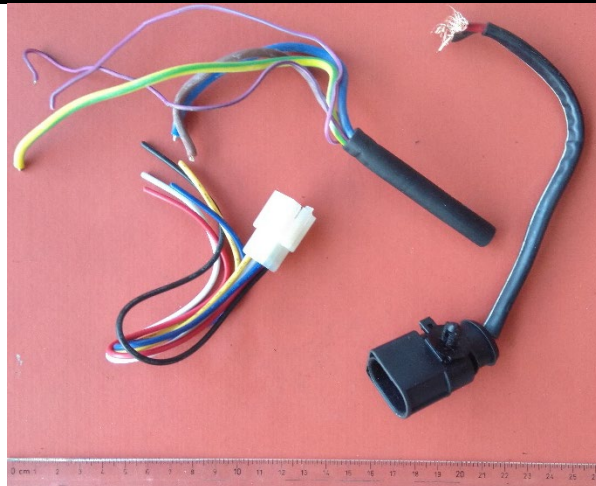
Eine Leiterplatte (engl. Printed circuit board, PCB) ist ein Träger aus Kunststoff für elektronische Bauteile (Kondensatoren, Prozessoren, elektrische Widerstände, etc.). Diese befindet sich unter anderem in Steuergeräten und enthält Kupfer (Cu) und viele Arten von Seltenen Technologie Metalle (STM),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

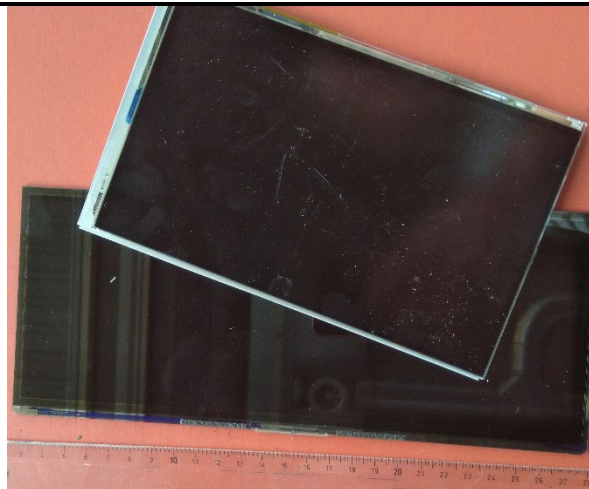
Ein Motor ist eine Maschine, die aus elektrischer Energie Bewegung erzeugt. Der Aufbau besteht aus einer Stahl- oder Eisenstruktur (Stator und Rotor), welche sich in einem metallischen Gehäuse befindet, und Kupferwicklungen. Ein Motor enthält auch meistens ferrit- oder Neodym-reiche Magnete. Motoren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

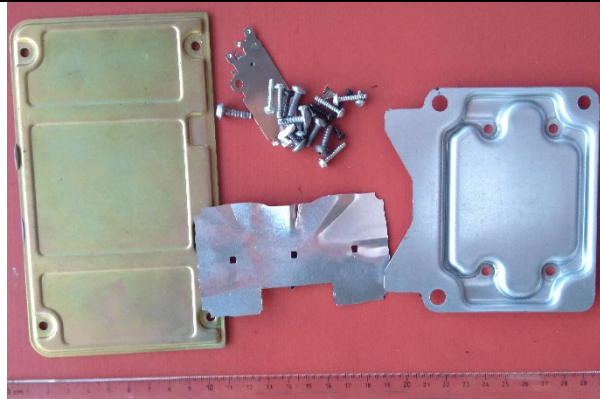


Komponente

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

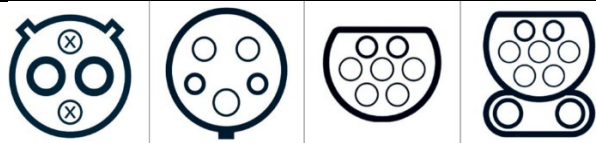
Elektrische Kabel können in einer Vielzahl von Gerätetypen enthalten sein, z.B. in Batterieladegeräten oder Ähnlichem. Enthalten vor allem Kupfer oder Kupferlegierungen, sowie Kunststoffe. Der Unterschied zur Kategorie der Kabel und Steckverbindungen besteht im Durchmesser der Kabel. Elektrische Kabel 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 \(energieloesung.de\)](http://energieloesung.de)



Komponente

Rest

Beschreibung

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



