

# **Zukünftige Materialflüsse in der Fahrzeugflotte**

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

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

## AutorInnen

Charles Marmy<sup>1</sup>

Manuele Capelli<sup>1</sup>

Heinz Böni<sup>1</sup>

**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

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
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	Bestimmung der zukünftigen Materialflüsse in der Fahrzeugflotte .....	11
<b>2</b>	<b>Methodik .....</b>	<b>12</b>
2.1	Ansatz .....	12
2.2	Inputparameter zum dmFA .....	12
2.3	Zukunftsszenarien zu Antriebstechnologien von Neufahrzeugen.....	14
2.4	Fallbeispiel: Bestimmung des zukünftigen Recyclingpotenzials von Nd und Dy aus Elektromotoren .....	17
<b>3</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>Referenzen .....</b>	<b>24</b>
Anhang A	Liste der identifizierten Gerätetypen.....	27
Anhang B	Liste der EEG Bestandteile .....	37

## **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:	Beschreibung und Datenquellen der Inputparameter.....	13
Tabelle 5:	Durchschnittsmasse an elektrische Antriebsmotor und STM für jede Antriebstechnologie.....	19

## 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 5:	Szenario "Schnelle Elektrifizierung" der Entwicklung des Marktanteils pro Antriebstechnologien, die im Rahmen von EVA II entwickelt wurden. Das Szenario "Schnelle Elektrifizierung" wurde für die Fallstudie in diesem Bericht verwendet .....	14
Abbildung 6:	Szenario "Hindernis A: Ungenügende Elektrizitätsproduktion" der Entwicklung des Marktanteils pro Antriebstechnologie, die im Rahmen von EVA II entwickelt wurden .....	15
Abbildung 7:	Szenario "Hindernis B: Mangelnde Ladeinfrastruktur" der Entwicklung des Marktanteils pro Antriebstechnologie, die im Rahmen von EVA II entwickelt wurden .....	16
Abbildung 8:	Szenario "Hindernis C: External shock" der Entwicklung des Marktanteils pro Antriebstechnologie, die im Rahmen von EVA II entwickelt wurden .....	17
Abbildung 9:	Fahrzeugflotte nach Antriebstechnologie von 2010 bis 2050, basierend auf historischen Daten bis 2021 und auf dem Szenario "Schnelle Elektrifizierung" ab 2022 .....	20
Abbildung 10:	Anzahl der in der Schweiz recycelten xEVs und Masse an Elektroantriebsmotoren sowie enthaltenen STM in diesem Massenstrom von 2020 bis 2050. ....	21
Abbildung 11:	Masse an Nd, Dy und Cu enthalten in elektrische Antriebsmotoren mit Permanentmagneten von Fahrzeugen die in der Schweiz rezykliert werden von 2020 bis 2050 .....	22

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



## Zusammenfassung

Moderne Personenwagen enthalten eine beträchtliche Menge an eingebetteten elektronischen Geräten (EEG). Im Durchschnitt wird das Gesamtgewicht aller EEG pro Fahrzeug auf 30 bis 50 kg geschätzt. In den letzten Jahren hat die Anzahl dieser Geräte stark zugenommen. Ähnlich wie Heimelektronikgeräte (Computer, Telefon, Drucker, Bildschirme usw.) bestehen sie grösstenteils aus Industriemetallen (Eisen, Aluminium und Kupfer) und Kunststoffen, enthalten aber auch viele Seltene Technologiemetalle (STM) wie Edelmetalle (wie Gold, Silber, oder 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) auf, welche gemeinsam mit den Siedlungsabfällen verbrannt wird. Dabei geht der grösste Teil der enthaltenen STM verloren.

Im dMFA Modul werden die Massenflüsse im Schweizer Altfahrzeugrecyclingsystem modelliert. Dies beinhaltet die Massenflüsse der STM in Fahrzeugen. Die unterschiedlichen Antriebstechnologien beeinflussen den Einsatz bestimmter STM in Fahrzeugen und dadurch die Materialflüsse dieser STM im Recyclingsystem. Dies hat einen Einfluss auf die mögliche Menge von STM, die theoretisch zurückgewonnen werden kann.

Für die Bestimmung der Menge bestimmter STM in Zukunft wurden Szenarien der Entwicklung verschiedener Inputparameter des dMFA Moduls entwickelt. Dies beinhaltet die Entwicklung der Marktanteile verschiedener Antriebstechnologien in Neuwagen sowie der Flottengrösse in der Schweiz. Auf der Grundlage dieser Szenarien wurden mit der Verwendung des dMFA Moduls Simulationen durchgeführt, mit welchen die Menge von STM in Altfahrzeugrecyclingsystem ermitteln können. Die Ergebnisse dieser Simulationen dienen als Entscheidungshilfe für Massnahmen, welche die Akteure im Schweizerischen Alt-Fahrzeugrecyclingsystem zukünftig umsetzen können.

Illustrativ wurde das Recyclingpotenzial für Neodym (Nd) und Dysprosium (Dy) aus elektrischen Antriebsmotoren für Elektro- sowie Hybridfahrzeugen für das optimistische "Schnelle Elektrifizierung"-Szenario bestimmt. Viele elektrische Antriebsmotoren benötigen starke Permanentmagnete, welche signifikante Mengen an Nd und Dy enthalten. Die Ergebnisse der Simulation zeigen eine beträchtliche Menge für Nd sowie Dy bis 2050 durch die Zunahme der Elektrofahrzeuge in der Schweizer Fahrzeugflotte.

Die im Szenario zusätzlich erwarteten Mengen dieser STM im Massenfluss des Altfahrzeugs-Recyclingsystems bilden eine Grundlage für den Entscheid, ob künftig ein grossflächiges Recycling dieser beiden STM aufgebaut werden soll.



# 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 verloren<sup>1</sup>.

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*

*(...)*

*<sup>2</sup> 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*

*(...)*

---

<sup>1</sup> 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].

<sup>2</sup> 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.

(...)

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

(...)

Art. 9 Entsorgungspflicht

<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup> 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 wiegen<sup>2</sup>, 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

<sup>2</sup> 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). **(siehe Kapitel 2)**
- B. Simulation von Zukunftsszenarien der EEG- und STM-Massenflüsse im Altfahrzeug-Recyclingsystem durch die Entwicklung der Schweizer Fahrzeugflotte als Entscheidungshilfe für die Akteure im System. **(siehe Kapitel 3)**
- C. Bestimmung der aktuellen Leistung des Schweizer Altfahrzeug-Recyclingsystems in Bezug auf Verluste und Rückgewinnung von STM und anderer Wertstoffe in EEG. **(siehe Kapitel 4)**

Als Grundlage aller Arbeiten von EVA II wurden die verschiedenen weiteren 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 [18]	A, B, C	Beschreibung des dMFA-Moduls des Gesamtmodells mit illustrativen Ergebnissen der Fahrzeug-, Geräte- und Elementemassenströme in der Schweiz.
B2	Materialverwertungsmodul [19]	C	Beschreibung des Moduls zur Materialrückgewinnung mit den Ergebnissen der zurückgewonnenen Materialien für jede Gerätekategorie und jeden Gerätetyp.
B3	Wirtschaftsmodul [20]	A	Beschreibung des Wirtschaftsmoduls mit den Ergebnissen der Kosten des Ausbaus und separatem Recycling für jeden Gerätetyp.
B4	Ökobilanzmodul [21]	A	Beschreibung des Ökobilanzmoduls mit den Ergebnissen der Umweltbilanz des Ausbaus und separatem Recycling für jeden Gerätetyp.
B5	Versuche und Datenbeschaffung [22]	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 [23]	B	Beschreibung der mit der Arbeitsgruppe entwickelten Flottenentwicklungsszenarien und Diskussion ihrer Auswirkungen auf die Materialströme im Schweizer Autorecyclingsystem.
B7	Synthesebericht [24]	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 [25].
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 [19].
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 [21].

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 [20].

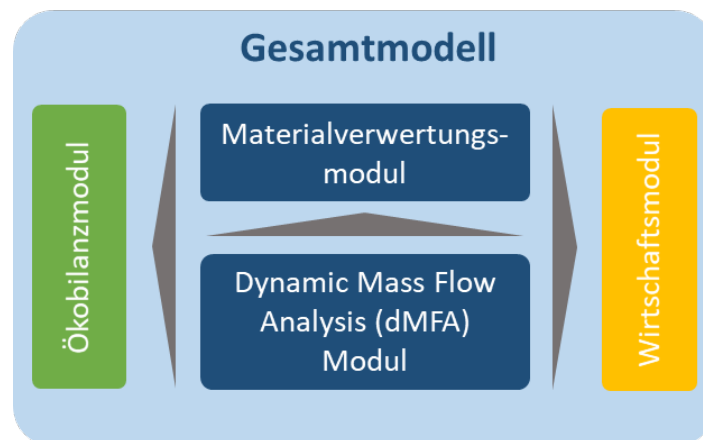


Abbildung 2: Konzeptuelle Architektur des Gesamtmodells (EVA II)

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.

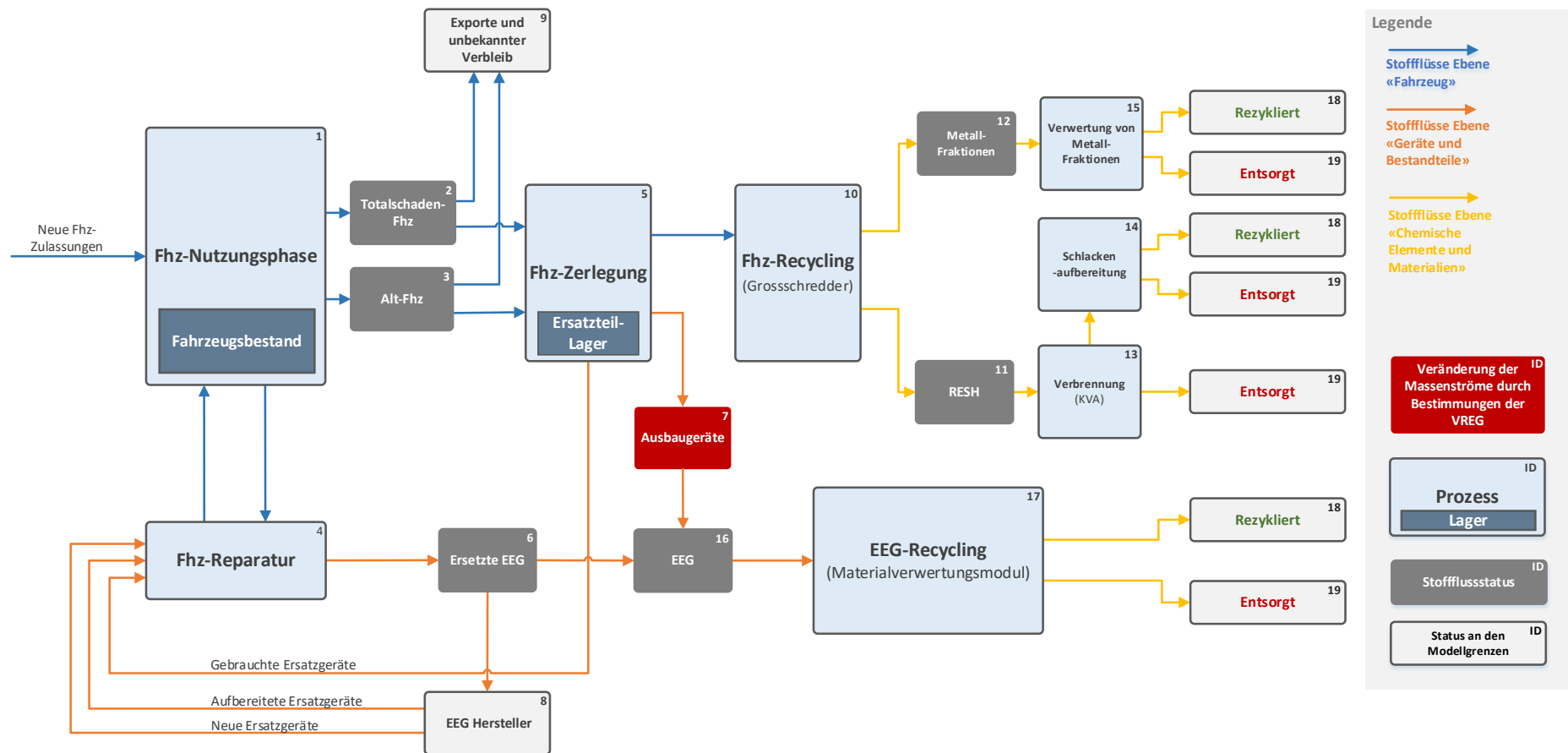


Abbildung 3: Übersicht über das modellierte schweizerische Altfahrzeugverwertungssystem



## 1.6 Bestimmung der zukünftigen Materialflüsse in der Fahrzeugflotte

Veränderungen der Materialflüsse im Schweizer Altfahrzeugrecyclingsystem haben verschiedene Auswirkungen auf die Akteure im Recyclingsystem. Beispielsweise wirkt sich die Veränderung der Menge insbesondere der wertvollen Industriemetalle auf die Einnahmen bei der Rückgewinnung aus. Dies kann Entscheidungen über künftige Investitionen beeinflussen. Die Abschätzung zukünftiger EEG- und STM-Massenflüsse im Altfahrzeug-Recyclingsystem dient somit als Entscheidungshilfe. Hierfür muss die Entwicklung der Zusammensetzung sowie die Grösse der Fahrzeugflotte sowie aller Materialflüsse im Recyclingsystem mit Hilfe der Daten des Vorkommens, der Masse sowie der Zusammensetzung von EEG bestimmt werden.

Der wichtigste Parameter in der Methodik ist die Entwicklung der Marktanteile verschiedener Antriebstechnologien bei verkauften Neuwagen in der Schweiz. Dieser Wert beeinflusst, wie viele Fahrzeuge einer bestimmten Antriebstechnologie im Altfahrzeug-Recyclingsystem verwertet werden. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Entwicklung der Grösse der Fahrzeugflotte.

Dieser Bericht enthält folgende Teile:

- Die Beschreibung der Methodik zur Durchführung von Simulationen mit Hilfe von Zukunftsszenarien und unter Beizug des dMFA Moduls
- Die Darstellung eines Fallbeispiels: Simulation zur Bestimmung des Rückgewinnungspotenzials von Nd und Dy aus elektrischen Antriebsmotoren, für das optimistische "Schnelle Elektrifizierung"-Szenario

Das Fallbeispiel dient als Illustration, wie das dMFA Modul als Entscheidungshilfe verwendet werden kann. Wie bereits erläutert, sind besonders die beiden Seltenerdmetalle Neodym und Dysprosium sehr wichtig für verschiedene Schlüsseltechnologien wie Windenergie sowie Fahrzeuge mit elektronischen Antriebsmotoren. Die Primärproduktion dieser Metalle ist auf wenige Länder beschränkt, was Versorgungsrisiken mit sich bringt. Trotz stark steigender Nachfrage weisen diese Seltenerdmetalle weiterhin sehr niedrige Recyclingsquoten aus. Aus diesen Gründen ist die Entwicklung von Rückgewinnungskapazitäten eines der Hauptanliegen der Europäischen Union [12]. Dies könnte auch die Entwicklungen in der Schweiz bei der Rückgewinnung von Seltenerdmetallen beeinflussen.

## 2 Methodik

### 2.1 Ansatz

Wie in 2.3 genauer erläutert wurden Szenarien über die zukünftige Entwicklung der Marktanteile der verschiedenen Antriebstechnologien und Flottengrösse entwickelt und mit Hilfe des dMFA-Moduls die daraus resultierenden Materialflüsse des Gesamtsystems der schweizerischen Altfahrzeugrecyclings bestimmt. (siehe Abbildung 2). Daraus konnten die Mengen an EEG und STM in diesen Strömen durch die Verwendung von Zusammensetzungsdaten für die entsprechenden Gerätetypen (im vorliegenden Fall für elektrische Antriebsmotoren mit Permanentmagneten) abgeschätzt werden.

Das dMFA-Modul erlaubt eine dynamische Betrachtung des Systems über mehrere Jahre (siehe Bericht zum dMFA Modul für eine ausführlichere Beschreibung des Moduls). Fahrzeuge, welche heute in der Schweiz neu zugelassen werden, können durch Unfälle aus der Flotte ausscheiden oder sie verlassen nach 15-20 Jahren Nutzung den Flottenbestand als Altfahrzeuge. Diese werden in der Schweiz rezykliert oder als Gebrauchtfahrzeug exportiert. Der Abfluss aus dem System kann aus dem Flottenbestand mit der Anzahl der Neuzulassungen, der Lebensdauer eines Fahrzeugs sowie der Unfall- und Exportrate berechnet werden. Mit zusätzlichen Informationen zur Zusammensetzung der Gerätetypen sowie ihrer durchschnittlichen Masse in Fahrzeuge können die Materialflüsse für Gerätetypen und STM ermittelt werden, welche in allen Altfahrzeugen in einem bestimmten Jahr enthalten sind. Dies ergibt Rückschlüsse auf das Recyclingpotenzial dieser Metalle.

### 2.2 Inputparameter zum dMFA

Ein wichtiger Parameter für die Szenarien entwickelt wurden, ist die Entwicklung der Schweizer Fahrzeugflotte. Um die Entwicklung dieses Parameters abzuschätzen, wurden drei offizielle Szenarien (siehe Tabelle 3) zur demografischen Entwicklung mit drei Szenarien zum Fahrzeugbesitz pro Person kombiniert.

Mit Statistiken und Daten zu Neuzulassungen, Exportraten, Unfällen usw. in der Schweiz kann man die Inputparameter des dMFA-Moduls festlegen, um über kurz- bis mittelfristige Zeithorizonte (ca. 15 Jahre) relativ präzise Vorhersagen der Massenströme zu machen. Für langfristige Zeithorizonte (>15 Jahre), welche über die Lebenserwartung eines Fahrzeugs hinausgehen, müssen Szenarien aus extrapolierten aktuellen Trends erstellt werden, um die Entwicklung der Inputparameter in der Zukunft abzuschätzen (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 4: Beschreibung und Datenquellen der Inputparameter

Parameter	Datenquelle		Kommentare
	Kurzfristig	langfristig	
Anteil Neuzulassungen pro Antriebstechnologie	Statistiken [35]–[39]	Szenarien entwickelt in EVA II [23]	Es wurden mit der Arbeitsgruppe vom Projekt EVA II vier Elektrifizierungsszenarien entwickelt und diskutiert. Das Szenario "Optimistische Elektrifizierung ohne Hindernis" wurde für diesen Studienfall gewählt. Die Methodik zur Entwicklung dieser Szenarien ist im nächsten Kapitel beschrieben.
Bevölkerungsentwicklung	Statistiken [32], [35]–[38], [40]–[44]	Projektionen des BFS, andere Projektionen [40]	Das BFS entwickelte drei demographische Entwicklungsszenarien. Die Grundlage zu deren Bestimmung beruht auf Annahmen über die zukünftige Entwicklung von Fruchtbarkeit, Sterblichkeit, Einwanderung, Auswanderung und Erwerb des Schweizer Bürgerrechts. Das Referenzszenario wird unter Verwendung der Referenzhypothesen sowohl für die Fruchtbarkeit, als auch für die Sterblichkeit und die Migration berechnet. Das "hohe" Szenario ist eine Kombination aus den hohen Hypothesen für alle drei Komponenten der Bevölkerungsentwicklung; das "tiefe" Szenario ist eine Kombination aus den tiefen Hypothesen. Dabei wurde das Referenzszenario für diese Simulation gewählt. - Szenario A-00-2020 "Reference" des BFS
Fahrzeugbesitz pro Person	Statistiken [35]–[38], [45], [46]	Szenarien entwickelt in EVA II und andere Projektionen [23], [32], [35]–[38], [41], [42], [45], [47], [48]	Es wurden drei verschiedene Szenarien für die Entwicklung des Fahrzeugbesitzes in Betracht gezogen. Das Maximal-Szenario sieht ein kontinuierliches Wachstum des Fahrzeugbesitzes pro Person vor, das dem Trend der letzten 20 Jahre folgt. Das Minimal-Szenario sieht einen allmählichen Rückgang des Fahrzeugbesitzes auf 0,3 Fahrzeuge pro Person vor. Für dieser Simulation wurde das "mittlere" Szenario ausgewählt: - Stabilisierung des Fahrzeugbesitzes pro Person auf dem Wert von 2020
Altfahrzeugexportrate	Statistiken [35]–[39]	Wert der letzten Statistik verwendet (~80%) [23]	Dieser Parameter variiert jedes Jahr je nach Marktsituation und anderen Faktoren. Er lässt sich nur schwer vorhersagen. In den letzten Jahrzehnten ist er jedoch im Durchschnitt gestiegen und es wird nicht erwartet, dass er auf lange Sicht wieder sinkt. Aufgrund fehlender Daten (die meisten xEVs in der Flotte haben das Ende ihrer Lebensdauer noch nicht erreicht), wird keine Differenzierung nach Antriebstechnologien vorgenommen.
Lebenserwartung und Unfallrate eines Fahrzeugs	Daten der Stiftung Autorecycling Schweiz (SARS) über geschredderten Fahrzeuge im Zeitraum 2008-2018, detaillierten Daten über den Bestand (nach Jahrgang) für den Zeitraum 2010-2018 und Modellergebnissen aus dem EVA-I-Projekt [10], [13], [49]–[51]		In dieser Simulation werden keine Änderungen zwischen den Antriebstechnologien oder in der Zeit berücksichtigt. Aktuelle Daten deuten darauf hin, dass BEV eine durchschnittlich längere Lebenserwartung als ICEV haben könnten. Da die ersten serienmässig hergestellten Modelle das Ende ihrer Lebensdauer noch nicht erreicht haben, ist es unmöglich, dies genau zu quantifizieren.

## 2.3 Zukunftsszenarien zu Antriebstechnologien von Neufahrzeugen

Seit einigen Jahren steigt bei Neufahrzeugen der Anteil von Hybrid- (HEV), Plug-in-Hybrid- (PHEV) und reinen Elektrofahrzeugen (BEV), gemeinsam als Fahrzeuge mit Elektroantrieb (xEVs) benannt, in der Schweiz stark an. xEVs machten im Jahr 2021 43% aller in der Schweiz neuzugelassenen Fahrzeuge aus [19]. Szenarien zur Entwicklung der Marktanteile der Antriebstechnologien wurden zusammen mit der "Begleitgruppe" des Projekts EVA II, welche sich aus wichtigen Akteuren des Schweizer Automobilsektors zusammensetzt, in einem Workshop diskutiert und entwickelt: Der Entwicklungsansatz der Szenarien umfasste zwei Schritte.

1. Festlegung eines "Schnelle Elektrifizierung" Szenarios, welches auf optimistischen Einschätzungen der Begleitgruppe zur Elektrifizierung der Fahrzeugflotte basiert
2. Die Festlegung von drei zusätzlichen Szenarien, bei denen verschiedenen Hindernisse die optimistische Entwicklung bremsen könnten. Die Stärke, wie die Hindernisse die Entwicklung beeinflussen, wurde durch die Begleitgruppe bestimmt.

Es wurden also vier Szenarien entwickelt: "Schnelle Elektrifizierung"; "Hindernis A: Ungenügende Elektrizitätsproduktion"; "Hindernis B: Mangelnde Ladeinfrastruktur"; "Hindernis C: External shock". (siehe Abbildung 4).

### 2.3.1 Szenario – "Schnelle Elektrifizierung"

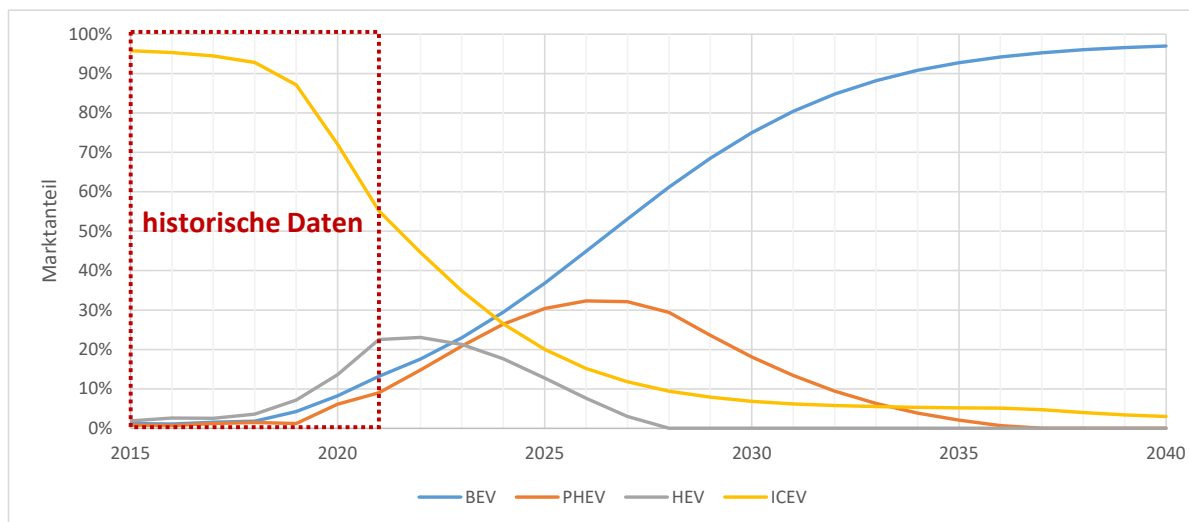


Abbildung 4: Szenario "Schnelle Elektrifizierung" der Entwicklung des Marktanteils pro Antriebstechnologien, die im Rahmen von EVA II entwickelt wurden. Das Szenario "Schnelle Elektrifizierung" wurde für die Fallstudie in diesem Bericht verwendet. BEV steht für Battery Electric Vehicle (reine Elektrofahrzeuge), PHEV und HEV für (Plug-in) Hybrid Electric Vehicle, und ICEV für Internal Combustion Engine Vehicle (Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren)

Das Szenario "Schnelle Elektrifizierung" geht von einer raschen Elektrifizierung der Schweizer Fahrzeugflotte aus. Es prognostiziert einen Marktanteil der Elektrofahrzeuge (xEVs) in den Neuzulassungen von 40% im Jahr 2022 und 75% BEV im Jahre 2030. Im Jahr 2040 sind nur noch

5% aller neuen Fahrzeuge Verbrenner (ICEV)<sup>3</sup>. Ein kleiner Anteil an ICEV Fahrzeugen wird für bestimmte Verwendungszwecke auf dem Markt bleiben. Hybridfahrzeuge (HEV und PHEV) werden anteilmässig in der Schweiz am meisten im Jahr 2024 verkauft, verschwinden allerdings im Jahr 2035. Dies deckt sich mit den Ankündigungen mehrerer Hersteller, welche im Laufe der nächsten Jahre keine ICEV Fahrzeuge mehr produzieren werden. Dieser Trend wurde ausgelöst durch immer striktere Anforderungen betreffend des CO<sub>2</sub>-Ausstosses von Neufahrzeuge sowie daraus ausgelöste strategische Neuorientierungen der Automobilhersteller.

Dieses Szenario basiert auf der Hypothese, dass sich die schnelle Elektrifizierung der letzten Jahre in der Zukunft ungehindert fortsetzt, mit einer starken Nachfrage, einem ausreichenden Angebot und keinem besonderen Hindernis für das Wachstum der reinen Elektrofahrzeuge in der Flotte.

Hybridfahrzeuge (HEV und PHEV) werden als Übergangstechnologien betrachtet. Sie ermöglichen die durchschnittlichen Abgaswerte von Neufahrzeugen zu reduzieren und somit Strafzahlungen zu vermeiden, sowie Bedenken der Bevölkerung betreffend Reichweite von reinen Elektrofahrzeugen entgegenzukommen. Langfristig werden reine Elektrofahrzeuge Hybridfahrzeuge aus dem Markt verdrängen.

### 2.3.2 Szenario – "Hindernis A: Ungenügende Elektrizitätsproduktion"

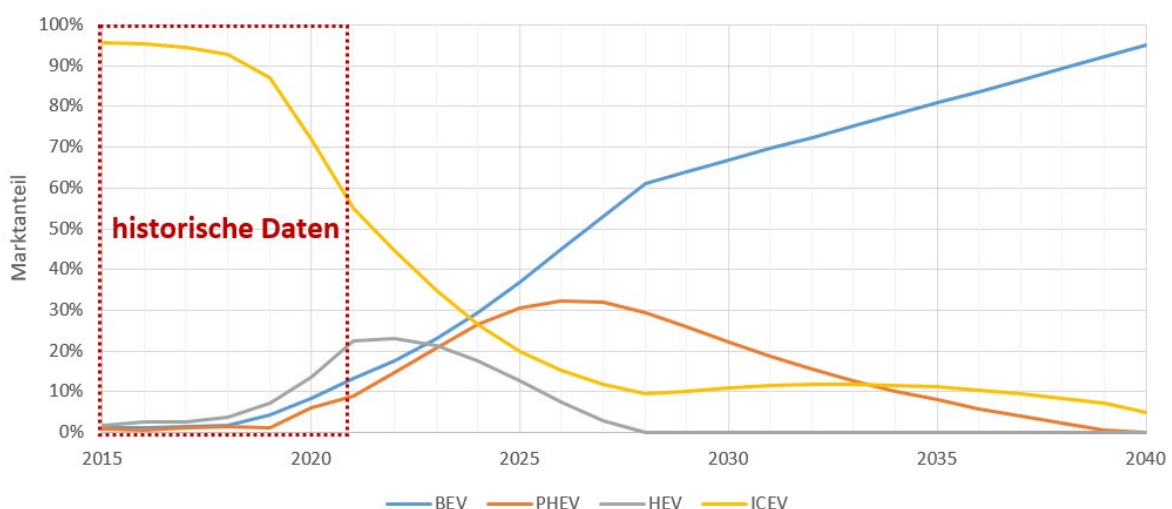


Abbildung 5: Szenario "Hindernis A: Ungenügende Elektrizitätsproduktion" der Entwicklung des Marktanteils pro Antriebstechnologie, die im Rahmen von EVA II entwickelt wurden. BEV steht für Battery Electric Vehicle (reine Elektrofahrzeuge), PHEV und HEV für (Plug-in) Hybrid Electric Vehicle, und ICEV für Internal Combustion Engine Vehicle (Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren)

Dieses Szenario berücksichtigt die Annahme, dass die Elektrifizierung der Flotte entlang der im Szenario "Schnelle Elektrifizierung" beschriebenen Dynamik folgt, aber diese Entwicklung durch eine unzureichende Stromproduktion, die in einem bestimmten Jahr auftritt, beeinträchtigt wird.

<sup>3</sup> EU Entscheid zum Verbrenner-Aus im Jahr 2035 wurde erst nach der Festlegung der Szenarien im Workshop bekannt gegeben

Von da an wird das Wachstum des Marktanteils von reinen Elektrofahrzeugen (BEV) durch das Wachstum der Stromerzeugungskapazität begrenzt. Im vorliegenden Beispiel wird die unzureichende Stromproduktion im Jahr 2028 spürbar, und das Wachstum der Stromproduktionskapazität ermöglicht im Vergleich zum Szenario "Schnelle Elektrifizierung" nur einen langsameren Anstieg des Marktanteils von BEV im Laufe der Zeit. Im Jahr 2040 erreicht der Marktanteil von BEV 95% des Werts, den er bei ausreichender Elektrizitätsproduktion erzielt hätte. In diesem Szenario werden Plug-in-Hybride (PHEV) länger gekauft und Verbrennungsfahrzeuge halten ihren Marktanteil bei etwa 10 %.

### 2.3.3 Szenario – "Hindernis B: Mangelnde Ladeinfrastruktur"

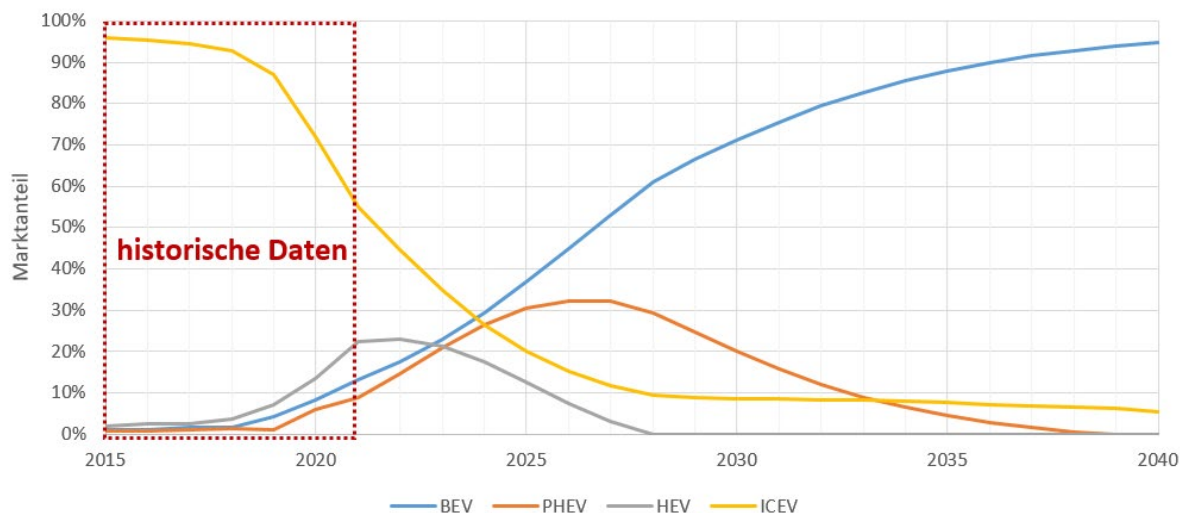


Abbildung 6: Szenario "Hindernis B: Mangelnde Ladeinfrastruktur" der Entwicklung des Marktanteils pro Antriebstechnologie, die im Rahmen von EVA II entwickelt wurden. BEV steht für Battery Electric Vehicle (reine Elektrofahrzeuge), PHEV und HEV für (Plug-in) Hybrid Electric Vehicle, und ICEV für Internal Combustion Engine Vehicle (Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren)

In diesem Szenario wird die schnelle Elektrifizierung der Flotte durch einen Mangel an Ladeinfrastruktur behindert, der ab einem bestimmten Jahr spürbar wird. Dies führt zu einer Verlangsamung des Wachstums des Marktanteils von reinen Elektrofahrzeugen (BEV), welche sich der Entwicklung dieser Infrastruktur anpassen muss. Wie im letzten Beispiel führt dies zu einer Verlängerung der Auslaufphase von Hybridfahrzeugen (PHEV) und zu einer Stabilisierung des Marktanteils von Verbrennungsfahrzeugen. Im aktuellen Beispiel werden die Auswirkungen der fehlenden Ladeinfrastruktur im Jahr 2028 deutlich. Im Jahr 2030 liegt der Marktanteil von BEV immer noch 5 % unter dem Wert des optimistischen Szenarios "Schnelle Elektrifizierung".



### 2.3.4 Szenario – "Hindernis C: External shock"

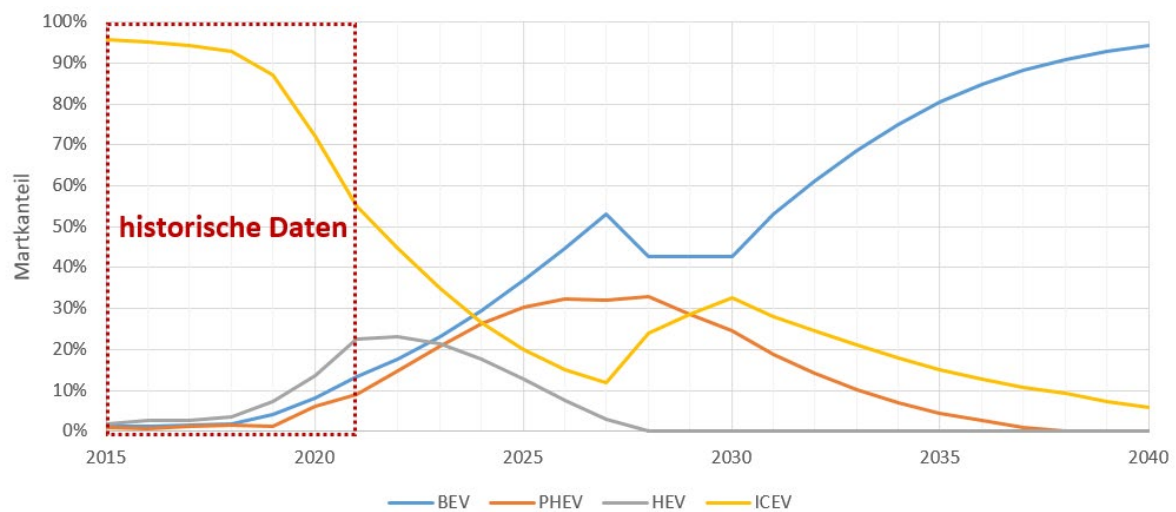


Abbildung 7: Szenario "Hindernis C: External shock" der Entwicklung des Marktanteils pro Antriebstechnologie, die im Rahmen von EVA II entwickelt wurden. BEV steht für Battery Electric Vehicle (reine Elektrofahrzeuge), PHEV und HEV für (Plug-in) Hybrid Electric Vehicle, und ICEV für Internal Combustion Engine Vehicle (Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren)

In diesem Szenario hat ein externer Schock in der Lieferkette der Elektrofahrzeugproduktion negative Auswirkungen auf die schnelle Elektrifizierung der Flotte. Ein solcher Schock könnte die plötzliche Unverfügbarkeit eines Rohstoffs auf dem internationalen Markt sein, der für die Produktion von Batterien notwendig ist, wie z.B. Kobalt oder Lithium, oder von Komponenten, die hauptsächlich in Elektrofahrzeugen verwendet werden.

Unmittelbar nach dem Schock sinkt der Marktanteil von reinen Elektrofahrzeugen (BEV) im Szenario, weil die Produktion der Fahrzeuge beeinträchtigt ist. Dieser Effekt bleibt so lange bestehen, bis die Automobilindustrie alternative Lösungen gefunden hat. Dies könnten beispielsweise neue Quellen für das gleiche Material oder die Substitution durch alternative Materialien sein. Sobald eine Lösung für den Schock gefunden ist, erholt sich die Produktionskapazität von Elektrofahrzeugen, und gleicht sich wieder ihren früheren Trend an. Während des Schocks steigt der Marktanteil von Verbrennungsfahrzeugen (ICEV) kurzfristig an, um die Lücke auszugleichen. Es wird angenommen, dass der Schock auch die Produktion von Hybridfahrzeugen (HEV und PHEV) teilweise beeinträchtigt. Im aktuellen Beispiel tritt der Schock im Jahr 2028 auf und dauert ein Jahr, bevor er sich innerhalb von zwei Jahren wieder auf seinen früheren Trend einstellt.

### 2.4 Fallbeispiel: Bestimmung des zukünftigen Recyclingpotenzials von Nd und Dy aus Elektromotoren

Für die Simulation im vorliegenden Beispiel wurde das Szenario "Schnelle Elektrifizierung" in Kombination mit den mittleren Szenarien zur Entwicklung der Flottengröße verwendet. Dies beinhaltet die demographischen Entwicklung (Referenzszenario des BFS siehe Tabelle 3) und die Entwicklung des Fahrzeugbesitzes pro Kopf (Stabilisierung auf dem aktuellen Niveau).

Die Kombination von den aktuellen Statistiken und extrapolierten aktuellen Trends sowie Szenarien ermöglicht die Erstellung von Zeitreihen für jeden Parameter der Simulation. Das dMFA Modul verwendet die Zeitreihen der Inputparameter (Marktanteil jeder Antriebstechnologie, Lebenserwartung und Unfallraten der Fahrzeuge, Entwicklung der Flottengröße und Exportrate), um die Anzahl der in der Schweiz recycelten Fahrzeuge pro Antriebstechnologie zu berechnen.

Fahrzeuge mit Elektroantrieb unterscheiden sich von Fahrzeugen mit Verbrennungsantrieb in der Art und Anzahl ihrer EEG und der Tatsache, dass sie zumindest teilweise auf einen elektrischen Antrieb angewiesen sind. Die meisten der verwendeten elektrischen Antriebsmotoren benötigen zum Betrieb starke Permanentmagnete, welche signifikante Mengen an Neodym und Dysprosium enthalten. Die elektrischen Antriebsmotoren enthalten auch grosse Mengen an Kupfer (siehe Tabelle 4). Im Gegensatz zu den anderen in dieser Studie betrachteten Gerätetypen, deren durchschnittliche Masse etwa 1-2 kg beträgt [34], kann ein einzelner elektrischer Antriebsmotor je nach Fahrzeugtyp bis zu 50 kg wiegen [35]. Das allein ist mehr als alle anderen Gerätetypen der Kategorie "Aktuator" zusammen. Mit steigendem Anteil an Elektrofahrzeugen in der Gesamtflotte wird deshalb eine signifikante Steigerung der Materialflüsse für Neodym, Dysprosium sowie Kupfer in der Fahrzeugflotte und im Recycling erwartet.

Kombiniert man die Anzahl der in der Schweiz recycelten Fahrzeuge mit der durchschnittlichen Masse der elektrischen Antriebsmotoren mit Permanentmagneten pro Fahrzeug mit ihrem Gehalt an Neodym, Dysprosium sowie Kupfer, können die Massenströme dieser Elemente abgeschätzt werden. Diese Daten sind in Tabelle 4 dargestellt.

Reine Elektrofahrzeuge (BEV) enthalten die durchschnittlich grösste Masse an elektrischen Antriebsmotoren, welche auch die grössten Anteile an STM enthalten. Jedoch bestehen je nach Modell grosse Schwankungen. Zum Beispiel besitzen gewisse BEV Induktionsmotoren, welche keine Permanentmagnete aufweisen. Alternativ, gibt es BEV Fahrzeugmodelle, welche zwei elektrische Antriebsmotoren enthalten anstelle von nur einem.

Für die Berechnung der durchschnittlichen Werte wurden Daten aus der JRC-Studie für RMIS, basierend auf technischen Daten über bestehende xEV-Modelle und europäischen xEV-Verkaufsdaten ab 2020, verwendet. [27], [28], [48]–[58]

Es wurden keine zeitlichen Veränderungen dieser Parameter (z.B. bei der Zusammensetzung) berücksichtigt. Magnete und elektrische Antriebsmotoren werden als stabile Technologien erachtet.

Tabelle 5: Durchschnittsmasse an elektrische Antriebsmotor und STM für jede Antriebstechnologie. BEV steht für Battery Electric Vehicle (reine Elektrofahrzeuge), PHEV und HEV für (Plug-in) Hybrid Electric Vehicle, und ICEV für Internal Combustion Engine Vehicle (Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren).

Antriebs- Technologie	elektrische Antriebsmo- tor pro Fahrzeug [kg]	Permanentmagnete pro Fahrzeug [kg]	Nd pro Fahrzeug [kg]	Dy pro Fahrzeug [kg]	Cu pro Fahrzeug [kg]
BEV	39.28	1.28	0.20	0.12	5.89
PHEV	34.55	1.13	0.17	0.10	5.18
HEV	22.89	0.75	0.11	0.07	3.43
ICEV	0	0	0	0	0

### 3 Ergebnisse

Die Simulation verwendete die Kombination der mittleren Szenarien zur demographischen Entwicklung (Szenario A-00-2020 "Referenz") und zum Fahrzeugbesitz (Stabilisierung auf dem aktuellen Niveau) sowie das Szenario "Schnelle Elektrifizierung" zur Markanteile der verschiedenen Antriebstechnologien.

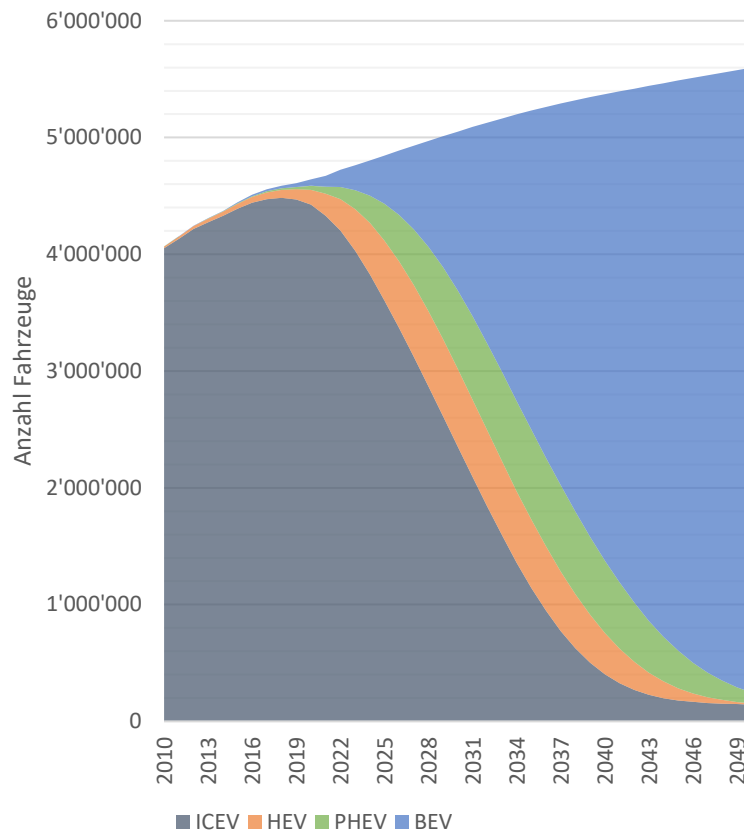


Abbildung 8: Fahrzeugflotte nach Antriebstechnologie von 2010 bis 2050, basierend auf historischen Daten bis 2021 und auf dem Szenario "Schnelle Elektrifizierung" ab 2022.

Abbildung 9 zeigt die Zusammensetzung der Schweizer Fahrzeugflotte im Laufe der Jahre. Die Marktanteile der Neuzulassungen verändern mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung die Zusammensetzung der gesamten Fahrzeugflotte. Im Vergleich der Grafiken wird dabei die lange Lebensdauer eines durchschnittlichen Fahrzeugs deutlich. Der Anteil an xEV an der gesamten Fahrzeugflotte erreicht im Jahr 2030 in der Simulation 50%. Im Szenario "Schnelle Elektrifizierung" wird von einer weiteren kontinuierlichen Steigerung der Fahrzeugflotte bis 2050 ausgegangen, basierend auf Entwicklungsszenarien des Wachstums der Schweizer Bevölkerung bei gleichbleibender Anzahl Fahrzeuge pro Person in der Schweiz.

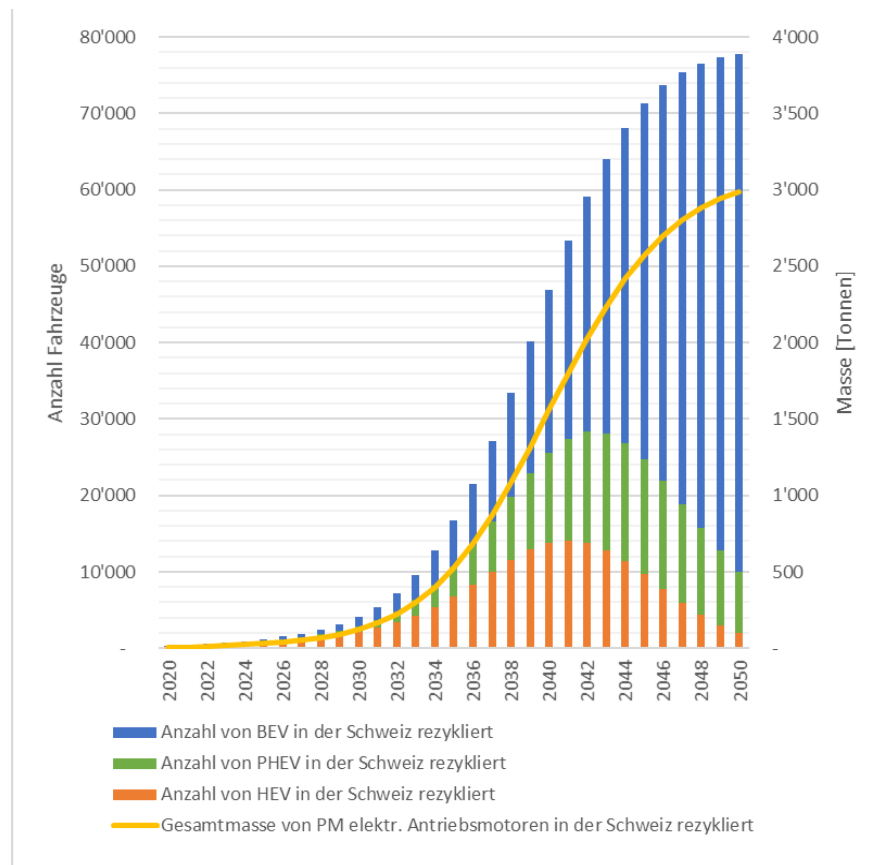


Abbildung 9: Anzahl der in der Schweiz recycelten xEVs und Masse an Elektroantriebsmotoren sowie enthaltenen STM in diesem Massenstrom von 2020 bis 2050.

In Abbildung 10 ist die Anzahl der in der Schweiz recycelten xEVs in der Simulation dargestellt. Wie im dMFA Modul genauer beschrieben, werden heute (Stand 2020) ungefähr 20% der Altfahrzeuge, die jedes Jahr die Flotte verlassen, in der Schweiz verwertet. Die restlichen 80% werden für den Weitergebrauch oder Entsorgung im Ausland exportiert. Daten zu einer xEV spezifischen Exportrate bestehen aufgrund der relativ geringen Zahl im heutigen Altfahrzeugstrom der xEVs noch nicht. Daher wurde die Veränderung der Exportrate in Zukunft in dieser Analyse nicht berücksichtigt.

Die Zahl der in der Schweiz recycelten HEV und PHEV steigt schnell an und erreicht im Jahr 2042 ihren Höhepunkt. Die Zahl der BEV beginnt schnell zu steigen, mit einer Verzögerung, die der Differenz zwischen den Importspitzen dieser Antriebstechnologien entspricht. Erst ab 2040 wird der Anteil von BEV grösser sein als die Anzahl der in der Schweiz recycelten HEV und PHEV, obwohl bei den Neuzulassungen diese Marke bereits 2025 erreicht sein wird. Somit steigt die Anzahl der in der Schweiz recycelten xEV von heute nahezu 0 auf über 70'000 im Jahr 2050. Die Masse der elektrischen Antriebsmotoren mit Permanentmagnete steigt noch stärker, da der Anteil an BEV steigt und deren Motoren schwerer sind als die der HEV und PHEV.

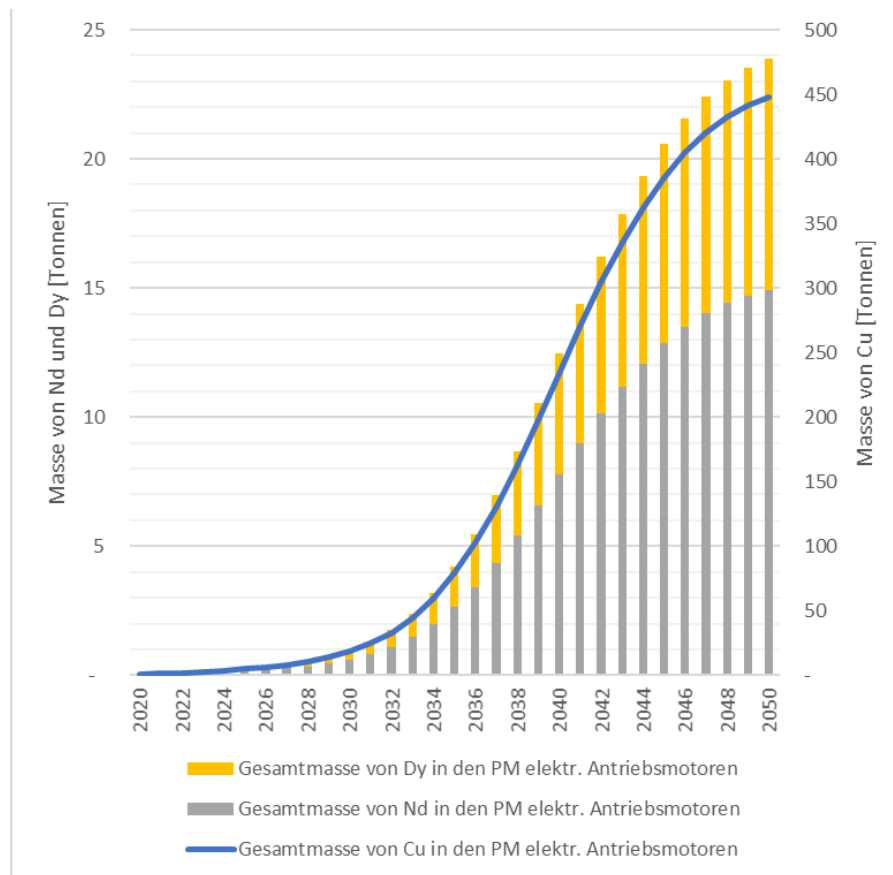


Abbildung 10: Masse an Nd, Dy und Cu enthalten in elektrische Antriebsmotoren mit Permanentmagneten von Fahrzeugen die in der Schweiz recycelt werden von 2020 bis 2050.

Abbildung 11 zeigt anhand der beschriebenen Entwicklung des Anteils der Antriebstechnologien in der Fahrzeugflotte und Recyclingstrom, die Massenflüsse von Nd, Dy und Cu von Fahrzeugen die in der Schweiz recycelt werden. Diese sind in elektrischen Antriebsmotoren mit Permanentmagnete enthalten. Für Neodym und Dysprosium steigt der Massenfluss von unter einer Tonne im Jahr 2030 zu über 20 Tonnen im Jahr 2050. Auch für das in Elektromotoren enthaltene Kupfer ist eine starke Steigerung zu erwarten, von wenigen Tonnen auf bis zu 450 Tonnen im Jahr 2050.



## 4 Schlussfolgerungen

Das Fallbeispiel zeigt, wie das Gesamtmodell aus EVA II ein Werkzeug für die quantitative Betrachtung der Massenflüsse an verschiedenen Stellen des schweizerischen Fahrzeugsystems (z.B. Reparatur, Zerlegung, Recycling, usw.) in der Schweizer Fahrzeugflotte für verschiedene Zeithorizonte sein kann. Im Modell können auf einfache Weise neue Daten hinzugefügt und weitere Fragestellungen sowie zusätzliche STM modelliert werden.

Unter der Annahme, dass die Veränderung der Flottenzusammensetzung sich weiter in schnellen Schritten in Richtung Elektroantrieb bewegt (dargestellt durch das Szenario "Schnelle Elektrifizierung"), ergibt sich mit einer gewissen Verzögerung auch eine stark ansteigende Menge an Altfahrzeugen mit elektrischen Antriebsmotoren mit Permanentmagneten<sup>4</sup>. Die Massenflüsse für die STM Neodym und Dysprosium im Altfahrzeugstrom werden stark ansteigen. Wenn keine industriellen Rückgewinnungsprozesse für diese STM geschaffen werden können, um das heutige Recyclingsystem zu ergänzen, gehen grosse Mengen dieser wichtigen Materialien verloren. Die Wichtigkeit der Metalle für Schlüsseltechnologien wie Windanlagen und Elektromobilität, sowie mögliche Versorgungsengpässe aufgrund der konzentrierten Primärproduktion auf wenige Länder, könnten zu Schwierigkeiten für die Lieferketten und Herausforderungen für abhängige Industriesektoren führen. Zudem verursacht die Primärproduktion derartiger Mengen an Seltenerdmetallen starke negative Umweltauswirkungen. Eine frühzeitige Entwicklung eines Recyclingsystems, welches einen Fokus auf die Rückgewinnung dieser STM legt, könnte helfen, diese Probleme zu mindern. Die Simulation zeigt klar, dass die Menge an Neodym und Dysprosium, welche aus Altfahrzeugen potenziell rückgewonnen werden könnte, in den nächsten Jahren stark ansteigen wird.

Die Geschwindigkeit der Elektrifizierung der Flotte ist allerdings von verschiedenen weiteren Faktoren abhängig. Die Entwicklung der Ladeinfrastruktur, der Stromproduktion und der Netzstabilität sowie die Entwicklung der Batterien. Diese benötigen grosse Mengen an STM sowie an anderen wichtigen Elementen wie Lithium, Kobalt, Nickel, Magnesium sowie Phosphor, welche ebenfalls von Versorgungsrisiken betroffen sein könnten. Andererseits könnten verbesserte Technologien die benötigte Menge an STM pro Fahrzeug in Zukunft reduzieren, wie es bei der Verwendung von Kobalt in der Batterieproduktion bereits beobachtet wird [52].

Die Untersuchungen zeigen, wie das Gesamtmodell mit dem dmFA Modul ein Werkzeug für die quantitative Betrachtung der Massenflüsse an verschiedenen Stellen in der Schweizer Fahrzeugflotte für verschiedene Zeithorizonte sein kann. Im Modell können auf einfache Weise neue Daten hinzugefügt und weitere Fragestellungen sowie zusätzliche STM modelliert werden.

---

<sup>4</sup> Aber nicht nur. Es gibt auch mehr elektrische Antriebsmotoren mit Induktion

## 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](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: Elektronik – Verwertung – Altfahrzeuge Dynamisches Stoffflussmodell Schlussbericht zum Arbeitspaket 3.1', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, May 2020.
- [9] C. Marmy, M. Capelli, and H. Böni, 'Projekt EVA II Elektronik – Verwertung – Altfahrzeuge: Recycling von eingebetteten Elektronikgeräten in Fahrzeugen - Das Materialverwertungsmodul', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2022.
- [10] C. Marmy et al., 'Projekt EVA II: Elektronik - Verwertung - Altfahrzeuge Eingebettete Elektronikgeräte in Personalfahrzeugen Arbeitspaket 3.3: Ökobilanzmodul Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, Feb. 2022.
- [11] C. Marmy, M. Capelli, R. Widmer, and H. Böni, 'Projekt EVA II Elektronik – Verwertung – Altfahrzeuge: Recycling von eingebetteten Elektronikgeräten in Fahrzeugen - das Wirtschaftsmodul', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2022.
- [12] R. Gauß et al., 'Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster of the European Raw Materials Alliance', Berlin, 2021.

- [13] 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>
- [14] 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>
- [15] 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](https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/daten.html?dyn_prodima=900175)
- [16] 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>
- [17] AGVS and AutoScout24, 'Marktindex Personenwagen Schweiz'. Jan. 23, 2017. [Online]. Available: <https://www.agvs-zs.ch/de/news/news-archiv/neuwagenpreise-steigen-occasionpreise-bleiben-tief>
- [18] C. Marmy, M. Capelli, and H. Böni, 'Projekt EVA II Elektronik – Verwertung – Altfahrzeuge: Recycling von eingebetteten Elektronikgeräten in Fahrzeugen - Szenarienanalyse und Entscheidungshilfe', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2022.
- [19] 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).
- [20] 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>
- [21] 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>
- [22] 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).
- [23] Auto-Schweiz, 'Alternative Antriebe', 2019. <https://www.auto.swiss/statistiken/alternative-antriebe> (accessed May 12, 2019).
- [24] O. fédéral du développement territorial ARE, 'Microrecensement mobilité et transports'. <https://www.aren.admin.ch/aren/fr/home/verkehr-und-infrastruktur/grundlagen-und-daten/verkehrsverhalten.html> (accessed Jul. 07, 2020).

- [25] Ferenc Biedermann et al., 'Comportement de la population en matière de transports - Résultats du microrecensement mobilité et transports 2015'. Office fédéral de la statistique (OFS), 2017. Accessed: Jul. 07, 2020. [Online]. Available: [https://www.are.admin.ch/dam/are/fr/dokumente/verkehr/dokumente/mikrozensus/verkehrsverhalten-der-bevolkerung-ergebnisse-des-mikrozensus-mobilitat-und-verkehr-2015.pdf.download.pdf/Mikrozensus\\_Verkehrsverhalten%20der%20Bev%C3%B6lkerung%202015\\_fr.pdf](https://www.are.admin.ch/dam/are/fr/dokumente/verkehr/dokumente/mikrozensus/verkehrsverhalten-der-bevolkerung-ergebnisse-des-mikrozensus-mobilitat-und-verkehr-2015.pdf.download.pdf/Mikrozensus_Verkehrsverhalten%20der%20Bev%C3%B6lkerung%202015_fr.pdf)
- [26] 'Scénarios de la population - Office fédéral de la statistique', Office fédéral de la statistique - Scénarios de la population. <https://www.viz.bfs.admin.ch/assets/01/ga-01.03.01/fr/index.html> (accessed Feb. 07, 2022).
- [27] EBP, 'Szenarien der Elektromobilität in der Schweiz - Update 2018', Zollikon, Schweiz, 2018. Accessed: Nov. 19, 2019. [Online]. Available: [https://www.ebp.ch/sites/default/files/unterthema/uploads/2018-03-05\\_EBP\\_CH\\_EmobSzen\\_PKW\\_2018\\_1.pdf](https://www.ebp.ch/sites/default/files/unterthema/uploads/2018-03-05_EBP_CH_EmobSzen_PKW_2018_1.pdf)
- [28] European Alternative Fuels Observatory, 'European Alternative Fuels Observatory: Switzerland', 2019. <https://www.eafo.eu/countries/european-union/23640/summary/compare> (accessed May 12, 2019).
- [29] E. Restrepo, A. Løvik, and R. Widmer, 'Projekt EVA Szenarien und Dynamik: Schlussbericht zu der Arbeitspaket C3', St. Gallen, 2018.
- [30] E. Restrepo, A. N. Løvik, P. Wäger, R. Widmer, R. Lonka, and D. B. Müller, 'Projekt EVA: Elektronik – Verwertung – Altautos. MFA Modell - Schlussbericht zum Arbeitspaket C1', Empa, St. Gallen, Schweiz, Jun. 2018.
- [31] SARS, 'Geshredderte Fahrzeuge 2008-2018', Stiftung Autorecycling Schweiz, Bern, 2019.
- [32] SARS, 'Annual Report 2019', Stiftung Auto-Recycling Schweiz, 2020. [Online]. Available: <https://stiftung-autorecycling.ch/downloads>
- [33] SARS, 'Annual Report 2020', Stiftung Auto-Recycling Schweiz, 2021. [Online]. Available: <https://stiftung-autorecycling.ch/downloads>
- [34] C. Marmy et al., 'Projekt EVA II Elektronik – Verwertung – Altautos: Recycling von eingebetteten Elektronikgeräten in Fahrzeugen - Versuche, Datenbeschaffung und Datenbanken', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2022.
- [35] 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>
- [36] R. Schmich, R. Wagner, G. Hörpel, T. Placke, and M. Winter, 'Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries', *Nat Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 267–278, Apr. 2018, doi: 10.1038/s41560-018-0107-2.

## 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



Quelle: <http://www.air-suspensionparts.com/quality-10728514-w166-car-air-suspension-kits-air-spring-compressor-pump-a166320104.html>

ID 02

**Gerätetyp**

Aktuatoren Bremsanlage (z.B. ABS, ESC)

**Standardbezeichnung**

BrakeSystemActuator

**Geräteklasse**

Aktuator



Quelle: <https://www.hella.com/techworld/de/Technik/Elektrik-Elektronik/ABS-ESP-Steuergeraete-fuer-Brems-und-Fahrdynamik-56049/>

ID 03

**Gerätetyp**

Anlasser

**Standardbezeichnung**

StarterMotor

**Geräteklasse**

Aktuator



Quelle: <https://www.mein-autolexikon.de/elektrik/anlasser.html>

ID 4

**Gerätetyp**

Batterie Management System

**Standardbezeichnung**

BatteryManagementSystem

**Geräteklasse**

Steuergerät



Quelle: <https://www.yoycart.com/Product/596055232405/>

ID 05

**Gerätetyp**

Drosselklappensteller

**Standardbezeichnung**

ThrottleActuator

**Gerätekategorie**

Aktuator

Quelle: <https://www.mein-autolexikon.de/elektronik/drosselklappe.html>

ID 06

**Gerätetyp**

DCDC Wandler

**Standardbezeichnung**

DCDCConverter

**Gerätekategorie**

Steuergerät

Quelle: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/leistungselektronik/hochspannungs-dc-dc-wandler-generation-3evo/>

ID 07

**Gerätetyp**

Elektrischer Antriebsmotor Induktion

**Standardbezeichnung**

BEVDriveMotorInduction

**Gerätekategorie**

Aktuator

Quelle: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/photos/detail/audi-e-tron-s-91940>

ID 08

**Gerätetyp**

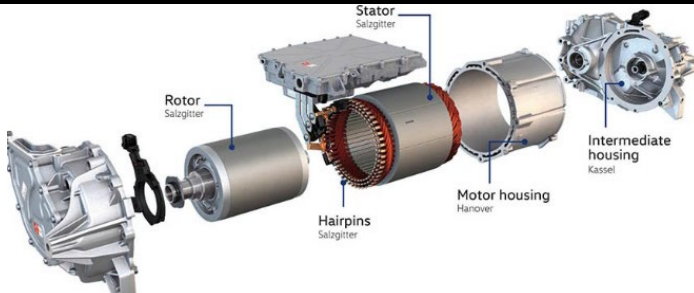
Elektrischer Antriebsmotor Permanentmagnet

**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

**Gerätekategorie**

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

**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><b>Gerätetyp</b> Kühlerlüftermotor</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> HeaterAndACFanMotor</p> <p><b>Geräteklasse</b> Aktuator</p>	
<p>Quelle: <a href="https://www.autodoc.de/tyc/7489545">https://www.autodoc.de/tyc/7489545</a></p>	
<p>ID 16</p> <p><b>Gerätetyp</b> Lautsprecher</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> Speaker</p> <p><b>Geräteklasse</b> Aktuator</p>	
<p>Quelle: <a href="https://www.multipianet.ch/lautsprecher-bass/fahrzeugspezifische-systeme-lautsprecher/mercedes1586/#page=1&amp;&amp;specialsOnly=0">https://www.multipianet.ch/lautsprecher-bass/fahrzeugspezifische-systeme-lautsprecher/mercedes1586/#page=1&amp;&amp;specialsOnly=0</a></p>	
<p>ID 17</p> <p><b>Gerätetyp</b> On-board Ladegerät (Elektrofahrzeug)</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> BatteryCharger</p> <p><b>Geräteklasse</b> Steuergerät</p>	
<p>Quelle: <a href="https://wheele.de/produkt/on-board-charger/">https://wheele.de/produkt/on-board-charger/</a></p>	
<p>ID 18</p> <p><b>Gerätetyp</b> Externes Ladekabel (Elektrofahrzeug)</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> ChargeCord</p> <p><b>Geräteklasse</b> Kabel</p>	
<p>Quelle: <a href="https://www.khonseve.com/product/ev-1-phase-charger/">https://www.khonseve.com/product/ev-1-phase-charger/</a></p>	
<p>ID 19</p> <p><b>Gerätetyp</b> Scheibenwischermotor</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> WiperMotor</p> <p><b>Geräteklasse</b> Aktuator</p>	
<p>Quelle: <a href="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/">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/</a></p>	



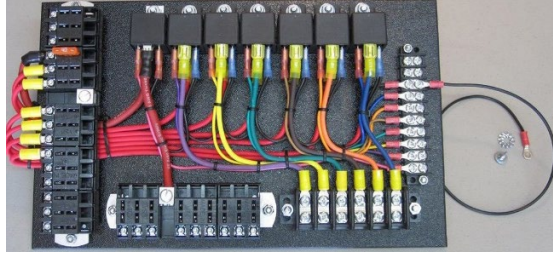
ID 20  
**Gerätetyp**  
 Scheinwerfer (vorne und hinten)  
**Standardbezeichnung**  
 Light  
**Gerätekategorie**  
 Scheinwerfer



Links: Quelle: <https://www.pkwteile.de/ersatzteil/ruckleuchte>

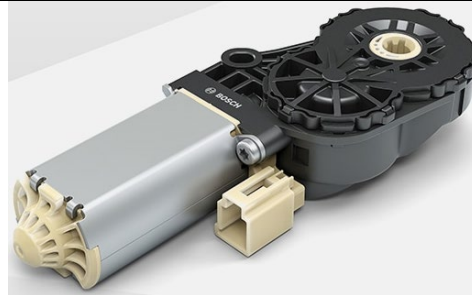
Rechts: Quelle: <https://www.hella.com/partnerworld/de/Produktprogramm/Fahrzeug-Beleuchtung/Hauptscheinwerfer-3214/>

ID 21  
**Gerätetyp**  
 Sicherungsbox/Verteiler  
**Standardbezeichnung**  
 FuseBox  
**Gerätekategorie**  
 Aktuator



Quelle: <https://www.tuningblog.eu/kategorien/tuning-wiki/sicherungskasten-255816/>

ID 22  
**Gerätetyp**  
 Sitzverstellungsmotor  
**Standardbezeichnung**  
 SeatMotor  
**Gerätekategorie**  
 Aktuator



Quelle: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/aktuatoren/sitzverstellantrieb/>

ID 23  
**Gerätetyp**  
 Steuergerät Antriebsmotor  
**Standardbezeichnung**  
 EngineControlUnit  
**Gerätekategorie**  
 Steuergerät

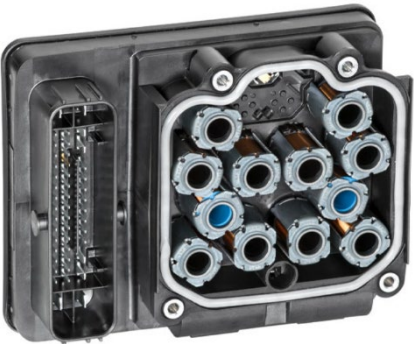







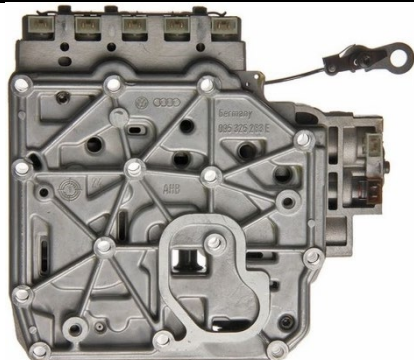

Quelle: <https://www.b-parts.com/en/store/products/4383599/engine-control-unit-ecu-vw-golf-v-1k1-19-tdi-0281013226-03g906021kh-e2-a1-25-1-2003-2004-2005-2006-2007-2008-2009-2010/>

ID 24  
**Gerätetyp**  
 Steuergerät Bordnetz/Karosserie  
**Standardbezeichnung**  
 BodyControlModule  
**Gerätekategorie**  
 Steuergerät








Quelle: [https://www.glistensky.shop/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=207473](https://www.glistensky.shop/index.php?main_page=product_info&products_id=207473)




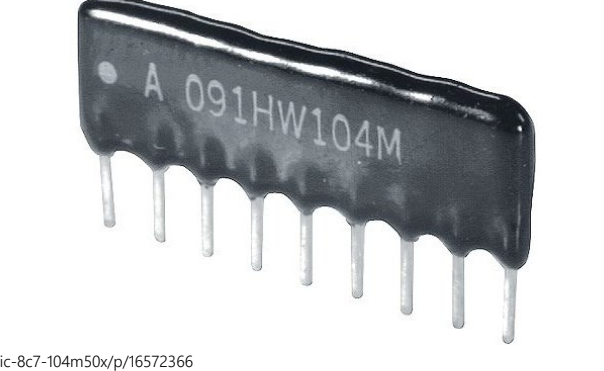

ID 25	
<b>Gerätetyp</b> Steuergerät Bremse und Fahrwerk (z.B. ABS, ESC) <b>Standardbezeichnung</b> BrakeSystemControlUnit SelfLevelingSuspensionController <b>Gerätekategorie</b> Steuergerät	
Quelle: <a href="https://www.hella.com/techworld/de/Technik/Elektrik-Elektronik/ABS-ESP-Steuergeraete-fuer-Brems-und-Fahrdynamik-56049/">https://www.hella.com/techworld/de/Technik/Elektrik-Elektronik/ABS-ESP-Steuergeraete-fuer-Brems-und-Fahrdynamik-56049/</a>	
ID 26	
<b>Gerätetyp</b> Steuergerät Fahrassistentz <b>Standardbezeichnung</b> AdaptiveCruiseControlController ElectronicPowerSteeringController ParkAssistantController <b>Gerätekategorie</b> Steuergerät	
Quelle: <a href="https://www.programainc.com/item_list.aspx?idcategory=38">https://www.programainc.com/item_list.aspx?idcategory=38</a>	
ID 27	
<b>Gerätetyp</b> Steuergerät Fahrassistentzsensoren <b>Standardbezeichnung</b> ParkingCameraController SignRecognitionCameraController ParkingRadarController <b>Gerätekategorie</b> Steuergerät	
Quelle: <a href="https://www.hella.com/hella-com/assets/media_global/2018.08.10_HELLA_Geschaeftsbericht_2018_360_Autonom_DE_geschuetzt.pdf">https://www.hella.com/hella-com/assets/media_global/2018.08.10_HELLA_Geschaeftsbericht_2018_360_Autonom_DE_geschuetzt.pdf</a>	
ID 28	
<b>Gerätetyp</b> Steuergerät Infotainment (Sound-, Navi-, und Multimedia) <b>Standardbezeichnung</b> InfotainmentNavigationSystem NavigationSystem SoundSystem <b>Gerätekategorie</b> Steuergerät	
Quelle: <a href="#">VW Display and Control Panel Genuine Volkswagen Part OE-Nr. 6C0-035-8, 399,90 € (bus-ok.de)</a>	

<p>ID 29</p> <p><b>Gerätetyp</b> Steuergerät Insassenschutz (z.B. Airbagsteuerung)</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> AirbagController</p> <p><b>Gerätekategorie</b> Steuergerät</p>	
<p>Quelle: <a href="https://www.endera.de/airbagsteuergeraet-reparatur-vw-golf-iv.html">https://www.endera.de/airbagsteuergeraet-reparatur-vw-golf-iv.html</a></p> <p>ID 30</p> <p><b>Gerätetyp</b> Steuergerät Klimaautomatik</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> HabitacleClimateController</p> <p>SeatHeatingController</p> <p><b>Gerätekategorie</b> Steuergerät</p>	
<p>Quelle: <a href="https://autodogs.de/produkt/bmw-e90-e91-klimabedienteil-bedienteil-klimaautomatik-6199260-klima-schalter/">https://autodogs.de/produkt/bmw-e90-e91-klimabedienteil-bedienteil-klimaautomatik-6199260-klima-schalter/</a></p> <p>ID 31</p> <p><b>Gerätetyp</b> Steuermodul/Schieberkasten autom. Getriebe</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> TransmissionControlUnit</p> <p><b>Gerätekategorie</b> Steuergerät</p>	
<p>Quelle: <a href="https://classicparts.de/Schieberkasten-fuer-4-Gang-Automatikgetriebe-Getriebekennbuchstabe-APCCBYCFBAPECBZCFCAPBCFA-Corrado">https://classicparts.de/Schieberkasten-fuer-4-Gang-Automatikgetriebe-Getriebekennbuchstabe-APCCBYCFBAPECBZCFCAPBCFA-Corrado</a></p> <p>ID 32</p> <p><b>Gerätetyp</b> Waschwasserpumpe</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> WindshieldWasherPump</p> <p><b>Gerätekategorie</b> 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><b>Gerätetyp</b> Zentralverriegelung</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> DoorLockActuator</p> <p><b>Geräteklasse</b> Aktor</p> <p>Quelle: <a href="https://www.autodoc.de/autoteile/schlosser-aussen-10787">https://www.autodoc.de/autoteile/schlosser-aussen-10787</a></p>	
<p>ID 34</p> <p><b>Gerätetyp</b> Verstärker</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> AudioAmplifier</p> <p><b>Geräteklasse</b> Steuergerät</p> <p>Quelle: <a href="https://www.techinn.com/en/sony-xmn1004-car-amplifier/137910321/p">https://www.techinn.com/en/sony-xmn1004-car-amplifier/137910321/p</a></p>	
<p>ID 35</p> <p><b>Gerätetyp</b> Luftinspritzpumpe</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> EngineAirInjectionPump</p> <p><b>Geräteklasse</b> Aktor</p> <p>Quelle: <a href="https://www.fcpeuro.com/products/bmw-air-pump-e46-pierburg-11727553056">https://www.fcpeuro.com/products/bmw-air-pump-e46-pierburg-11727553056</a></p>	
<p>ID 36</p> <p><b>Gerätetyp</b> Ladeklappe (Elektrofahrzeug)</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> PlugInsertPanel</p> <p><b>Geräteklasse</b> Aktor</p> <p>Quelle: <a href="https://akro-plastic.com/de/aktuelles/praxisbeispiele/ladeklappe-e-auto/">https://akro-plastic.com/de/aktuelles/praxisbeispiele/ladeklappe-e-auto/</a></p>	
<p>ID 37</p> <p><b>Gerätetyp</b> Tür-, Heckklappen- oder Schiebedachmotor</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> DoorHatchMotor SunroofMotor</p> <p><b>Geräteklasse</b> Aktor</p> <p>Quelle: <a href="https://www.amazon.de/T%C3%BCrschloss-Motorschloss-motorsperre-Lenkschloss-Radmotor/dp/B084P484W4">https://www.amazon.de/T%C3%BCrschloss-Motorschloss-motorsperre-Lenkschloss-Radmotor/dp/B084P484W4</a></p>	



<p>ID 38</p> <p><b>Gerätetyp</b> Servolenkungsaktuator</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> PowerSteeringActuator</p> <p><b>Geräteklasse</b> Aktuator</p> <p>Quelle: <a href="https://www.caranddriver.com/features/a27888229/power-steering/">https://www.caranddriver.com/features/a27888229/power-steering/</a></p>	
<p>ID 39</p> <p><b>Gerätetyp</b> Spiegelverstellungsmotor</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> MirrorMotor</p> <p><b>Geräteklasse</b> Aktuator</p> <p>Quelle: <a href="https://w220.wiki/File:W220_exterior_mirror_motor_A2038202242_opened_inside.jpg">https://w220.wiki/File:W220_exterior_mirror_motor_A2038202242_opened_inside.jpg</a></p>	
<p>ID 40</p> <p><b>Gerätetyp</b> Steuergerät Start Stop</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> StartStopController</p> <p><b>Geräteklasse</b> Controller</p> <p>Quelle: <a href="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">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</a></p>	
<p>ID 41</p> <p><b>Gerätetyp</b> Kondensator-Array für EV</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> CapacitorsEV</p> <p><b>Geräteklasse</b> Controller</p> <p>Quelle: <a href="https://www.distrelec.ch/en/ceramic-capacitor-array-100nf-50v-20-hosonic-8c7-104m50x/p/16572366">https://www.distrelec.ch/en/ceramic-capacitor-array-100nf-50v-20-hosonic-8c7-104m50x/p/16572366</a></p>	
<p>ID 42</p> <p><b>Gerätetyp</b> Verteilergetriebe</p> <p><b>Standardbezeichnung</b> TransferShiftActuator</p> <p><b>Geräteklasse</b> Aktuator</p> <p>Quelle: <a href="https://bs-getriebetechnik.de/BMW-X3-Verteilergetriebe-generalueberholt-27103455137-27103455135-Bj-2003-2011">https://bs-getriebetechnik.de/BMW-X3-Verteilergetriebe-generalueberholt-27103455137-27103455135-Bj-2003-2011</a></p>	

**ID** 43**Gerätetyp**

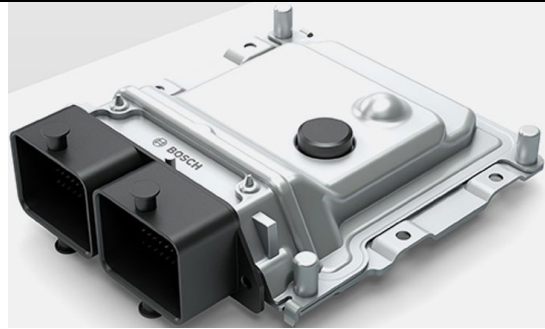
Vehicle Control Unit

**Standardbezeichnung**

VehicleControlUnit

**Geräteklasse**

Controller



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

## Anhang B      Liste der EEG Bestandteile

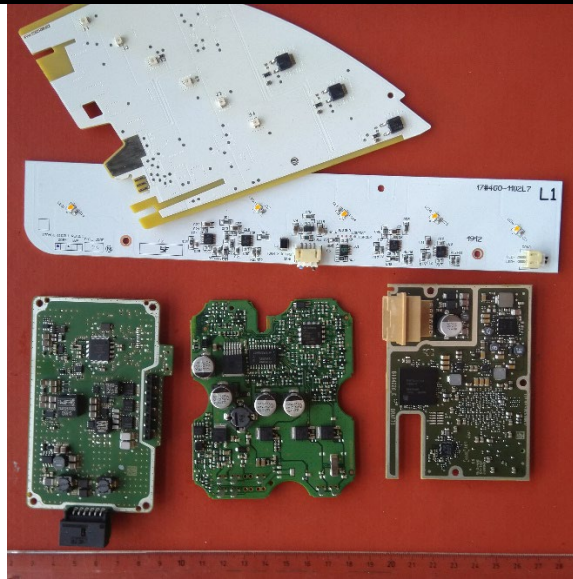
Bestandteil	Name in Datenbank	Enthalten in	Enthaltene relevante Materialien
Leiterplatte	PCB	Aktuatoren, Controller, Scheinwerfer	Edelmetalle (Gold, Silber, Platin), Kupfer, Kunststoffe
Stecker	Cables and connectors	Controller	Kunststoffe, Kupfer
Motor	Motor	Aktuatoren	Eisen, Kupfer, Neodym
Bildschirm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

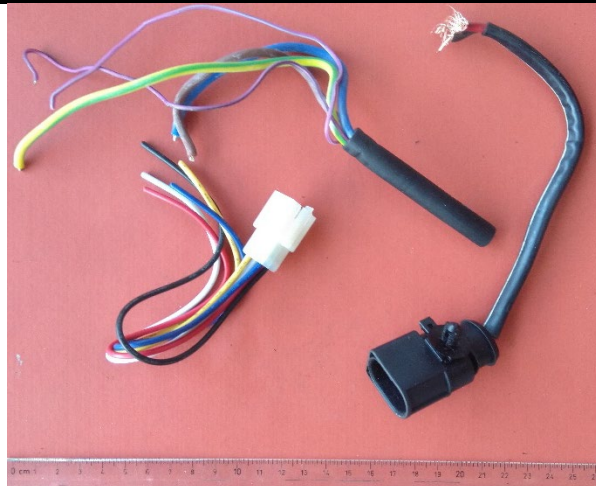
Eine Leiterplatte (engl. Printed circuit board, PCB) ist ein Träger aus Kunststoff für elektronische Bauteile (Kondensatoren, Prozessoren, elektrische Widerstände, etc.). Diese befindet sich unter anderem in Steuergeräten und enthält Kupfer (Cu) und viele Arten von Seltenen Technologie Metalle (STM),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

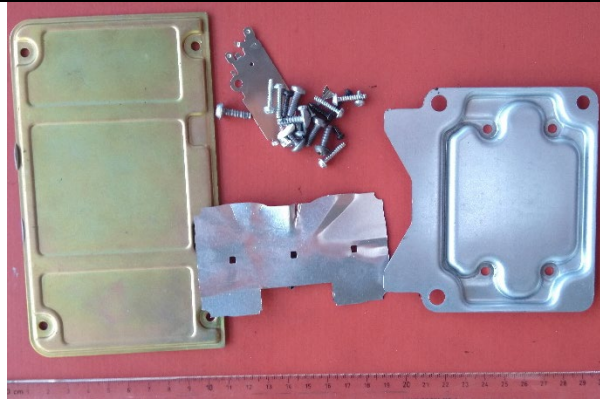


**Komponente**

Fe-Teile

**Beschreibung**

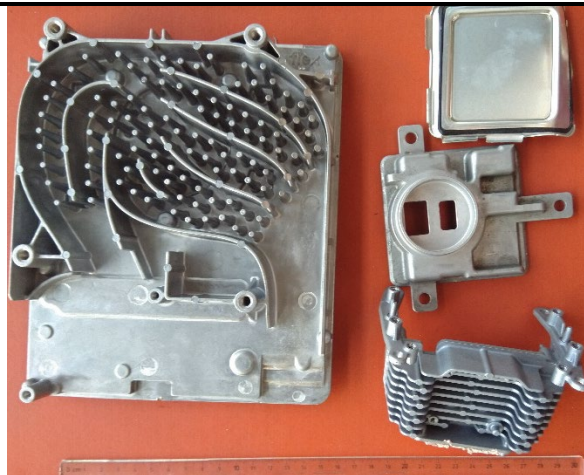
Eisen (Fe) als Element besitzt die Eigenschaften breite Verfügbarkeit (die es zu einem preiswerten Rohstoff macht) sowie Zähigkeit und Festigkeit von Eisenlegierungen. Es wird in der Regel nicht reines Fe verwendet, sondern Stahl oder Legierungen (z.B. Edelstahl), um gewisse Eigenschaften zu verbessern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

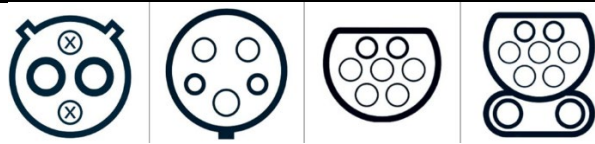
Elektrische Kabel können in einer Vielzahl von Gerätetypen enthalten sein, z.B. in Batterieladegeräten oder Ähnlichem. Enthalten vor allem Kupfer oder Kupferlegierungen, sowie Kunststoffe. Der Unterschied zur Kategorie der Kabel und Steckverbindungen besteht im Durchmesser der Kabel. Elektrische Kabel 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.





