

Elektronik
Verwertung
Altfahrzeuge

Projekt EVA II

Synthesebericht

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

Empa, Technology and Society Lab, Critical Materials and Resource Efficiency Group, 9014 St. Gallen¹

Autoren

Charles Marmy¹

Manuele Capelli¹

Heinz Böni¹

Nora Bartolome¹

Ursina Marseiler¹

Titelbild: ©C. Marmy, 2022

Hinweis

Dieses Projekt wurde mit finanzieller Unterstützung vom Bundesamt für Umwelt (BAFU), von der Stiftung Autorecycling Schweiz (SARS) und vom Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) durchgeführt. Wir bedanken uns bei den Firmen und Institutionen Thommen AG, Zweckverband Kehrrechtverwertung Zürcher Oberland (KEZO), Agroscope und HES-SO Valais Wallis für die Sachleistungen herzlich, sowie bei Solenthaler Recycling AG, Pro Business House AG, Häfeli Brügger AG, Altola AG, Laboratory for Advanced Analytical Technologies von der Empa, Bachema AG für die hervorragende Unterstützung und Beratung. Wir danken allen Personen aus diesen Institutionen und Firmen für ihre engagierte und wertvolle Mitarbeit. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

St. Gallen, Januar 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Kontext.....	1
1.2	Eingebettete elektronische Geräte und ihre Klassifizierung.....	2
1.3	Seltene Technologiemetalle	4
1.4	Bisherige Projekte	5
1.5	Ziel des Projekts EVA II.....	6
1.6	Das Gesamtmodell.....	7
2	Kosten und Umweltnutzen des separaten Recyclings von EEG	11
2.1	Einleitung und Ziele.....	11
2.2	Methodik.....	11
2.3	Ergebnisse.....	18
2.4	Schlussfolgerungen	28
3	Zukunftsszenarien der STM-Massenflüsse im Fahrzeugrecyclingsystem	30
3.1	Einleitung und Ziele.....	30
3.2	Methodik.....	31
3.3	Ergebnisse und Diskussion.....	36
3.4	Diskussion und Schlussfolgerungen	38
4	Verluste von STM und anderen Metalle im RESH aus Altfahrzeugen	40
4.1	Einleitung und Ziele.....	40
4.2	Methodik.....	41
4.3	Ergebnisse.....	46
4.4	Diskussion und Schlussfolgerungen	49
5	Schlussfolgerungen und Perspektiven	51
6	Literaturverzeichnis	53
Anhang A	Liste der identifizierten Gerätetypen.....	57
Anhang B	Liste der EEG Bestandteile	67
Anhang C	Parameter aus dem Materialverwertungsmodul.....	74
Anhang D	Wichtige Parameter und Hauptergebnisse des Gesamtmodells	77

Tabellen

Tabelle 1:	Gerätekategorien und ihrer typischen Bestandteile, 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:	Im Modul berücksichtigte Materialien	16
Tabelle 5:	Übersicht der im Ökobilanzmodul verwendeten Daten und deren Quellen	16
Tabelle 6:	Klassierung der Gerätetypen bei gleicher Gewichtung der ökologischen und wirtschaftlichen Perspektive.....	25
Tabelle 7:	Legende zur Qualität der Datenlage	27
Tabelle 8:	Beschreibung und Datenquellen der Inputparameter.....	32
Tabelle 9:	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).	35
Tabelle 10:	Beschreibung der Messmethodik von STM-Massenanteilen in RESH.....	42
Tabelle 11:	Schätzung des Rückgewinnungspotenzials ausgewählter STM in Massen sowie finanziellem Wert (LME).....	50
Tabelle 12:	Anteil der gesamten Recyclinginputmasse die jeden Behandlungs- und Transportprozess durchläuft, pro Gerätekategorie und Szenario.....	74
Tabelle 13:	Anteil der gesamten Recycling-Input-Masse, die verwertet werden kann, pro Material/Element für jede Gerätekategorie und jedes Szenario.	76
Tabelle 14:	Wichtige Parameter und Inputdaten.....	78
Tabelle 15:	Hauptergebnisse des Gesamtmodells.....	81

Abbildungen

Abbildung 1:	Illustrierung der Nomenklatur zur Kategorisierung der EEG im Rahmen des Projekts EVA II. Wie für die in dieser Abbildung dargestellte Gerätekategorie "Steuergeräte" enthält auch die Gerätekategorie "Aktuatoren" mehrere Gerätetypen. Die Gerätekategorie "Scheinwerfer" enthält jedoch nur den Gerätetyp "Scheinwerfer (vorne und hinten)", was in der Abbildung durch identische Bilder in beiden Spalten dargestellt ist. Auf der rechten Seite wird am Beispiel der Scheinwerfer dargestellt, dass ein bestimmter Gerätetyp mehrfach in einem Fahrzeug vorkommen kann.....	3
Abbildung 2:	Konzeptuelle Architektur des Gesamtmodells (EVA II).....	8
Abbildung 3:	Übersicht über das modellierte schweizerische Altfahrzeugverwertungssystem	10
Abbildung 4:	Struktur des Materialverwertungsmoduls.....	13
Abbildung 5:	Kosten für die Gesamtmasse der EEG einer Gerätekategorie pro Fahrzeug.....	19
Abbildung 6:	Vergleich von Umweltnutzen (helle Balken) und -belastung (dunkle Balken) nach Szenario und Gerätekategorie für GWP & UBP pro kg Gerätekategorie.....	21
Abbildung 7:	Unterschied zwischen den Umweltnutzen (für GWP & UBP) des Szenarios "EEG Ausbau" und des Szenarios "Baseline", pro kg jeder Gerätekategorie. Dies zeigt den Netto-Umweltnutzen von EEG-Ausbau und -Recycling im Vergleich zur aktuellen Situation.	21
Abbildung 8:	Umweltnutzen erzeugt durch einen Übergang vom Szenario "Baseline" zum Szenario "EEG Ausbau" für Gesamtmasse EEG pro Fahrzeug jeder Gerätekategorie.....	22
Abbildung 9:	Kosten und Umweltnutzen (UBP) pro Gerätetyp verursacht durch einen Wechsel vom Szenario "Baseline" zum Szenario "EEG Ausbau" (Achtung andere UBP Skala bei Scheinwerfern) (Teil 1/3).....	23
Abbildung 11:	Kosten und Umweltnutzen (UBP) pro Gerätetyp verursacht durch einen Wechsel vom Szenario "Baseline" zum Szenario "EEG Ausbau" (Teil 2/3).....	23
Abbildung 12:	Kosten und Umweltnutzen (UBP) pro Gerätetyp verursacht durch einen Wechsel vom Szenario "Baseline" zum Szenario "EEG Ausbau" (Teil 3/3).....	24
Abbildung 13:	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)	33

Abbildung 14: Szenario "Challenge 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)	33
Abbildung 15: Szenario "Challenge 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)	34
Abbildung 16: Szenario "Challenge 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).....	34
Abbildung 17: Fahrzeugflotte nach Antriebstechnologie von 2010 bis 2050, basierend auf historischen Daten bis 2021 und auf dem Szenario "Schnelle Elektrifizierung" ab 2022. BEV steht für Battery Electric Vehicle (reine Elektrofahrzeuge), PHEV und HEV für (Plug-in).....	36
Abbildung 18: Anzahl der in der Schweiz recycelten xEVs und Masse an Elektroantriebsmotoren sowie enthaltenen STM in diesem Massenstrom von 2020 bis 2050.	37
Abbildung 19: Masse an Nd, Dy und Cu enthalten in elektrische Antriebsmotoren mit Permanentmagnete von Fahrzeugen die in der Schweiz rezykliert werden von 2020 bis 2050.....	38
Abbildung 20: Beispielbild RESH des Experiments, aufgenommen nach der Probennahme bei der KEZO.....	41
Abbildung 21: Illustration des Unterschieds zwischen Messgenauigkeit gegenüber Messpräzision.....	43
Abbildung 22: Ablauf des Experiments, um die Präzision und Genauigkeit der Messmethodik zu beurteilen.....	45
Abbildung 23: Ergebnisse der statistischen Analyse. Die grüne Skala zeigt die STM für jedes Paar von Messreihen an, zwischen denen ein signifikanter statistischer Unterschied festgestellt wurde (je dunkler das Grün, desto signifikanter der Unterschied). Die Farben Blau und Rot zeigen für jeden Batch die STM an, für die der Varianzkoeffizient am niedrigsten bzw. am höchsten ist.....	46
Abbildung 24: Massenanteile der analysierten Elemente mit entsprechenden Grössenordnungen (ppm). "MIT" repräsentiert den Batch mit Motoren, und "OHNE" den Batch ohne Motoren.	48

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 "Geräteklasse" und "Gerätetyp" sind im Kapitel 1.2 genau definiert.
Geräteklasse	Eine Klasse bestehend aus verschiedenen Gerätetypen, welche eine ähnliche Zusammensetzung und Verhalten in der mechanischen Behandlung zeigen. Die Konzepte "Geräteklasse" 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.

Ziel des Projekts EVA II war es, ein dauerhaftes Monitoringsystem des Lebenszyklus von EEG in Fahrzeugen zu entwickeln, um politische Entscheidungen zu unterstützen, welche im Rahmen der revidierten VREG getroffen werden sollen. Es ging dabei um eine Abschätzung der Kosten sowie Umweltauswirkungen eines Systems, bei dem EEG vor der Behandlung des Fahrzeugs im Grossschredder ausgebaut werden und separat in Elektroschrottrecyclinganlagen recycelt werden. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass sich die Kosten eines Ausbaus und separaten Recyclings der EEG im Bereich von 190 CHF pro Altfahrzeug bewegen (entspricht ungefähr 0.5% des durchschnittlichen Verkaufspreises eines Neuwagens in der Schweiz im Jahr 2020). Die Ökobilanz des getrennten EEG-Recyclings zeigt für die EEG-Kategorien "Scheinwerfer", "Steuergeräte" und "Aktuatoren" einen signifikanten Umweltnutzen im Vergleich zum aktuellen Recyclingsystem. Der grösste Umweltnutzen wird durch eine bessere Rückgewinnung von Edelmetallen aus Leiterplatten, die Rückgewinnung von Plexiglas (PMMA) und eine Reduktion der zu verbrennenden Abfallmenge erzielt.

Das im Rahmen des Projekts entwickelte Modell ermöglicht die Simulation von Zukunftsszenarien der EEG- und STM-Massenflüsse im Altfahrzeug-Recyclingsystem. Es kann die Entwicklung der Schweizer Fahrzeugflotte abbilden und dient als Entscheidungshilfe für die Akteure im System.

Für die Messung der STM Verluste wurde im Rahmen der Studie ein Analyse- und Probenahmeprotokoll erstellt, welches die STM Mengen im RESH genau und präzise bestimmen kann. Dies ermöglicht die Messung der Leistung des Altfahrzeugrecyclingsystems und kann in Zukunft die Verbesserung der Rückgewinnung im Falle des separaten EEG Recycling aufzeigen.

Résumé

Les voitures modernes contiennent une quantité considérable d'appareils électroniques embarqués (EEE). En moyenne, le poids total de tous les EEE est estimé à 30 à 50 kg par véhicule. Ces dernières années, le nombre de ces appareils a fortement augmenté. Comme les appareils électroniques "domestiques" (ordinateurs, téléphones, imprimantes, écrans, etc.), ils sont principalement composés de métaux industriels (tels que le fer, l'aluminium ou le cuivre) ainsi que de plastique, mais contiennent également de nombreux métaux rares de haute technologie (STM pour "Scarce Technology Metals", en anglais) tels que certains métaux précieux (comme l'or, l'argent ou le platine, par exemple), de l'indium, du lithium, du germanium, du néodyme ou du tantale. Compte tenu du fait que le parc automobile suisse comptait 4,7 millions de véhicules en 2020 et que plus de 60'000 véhicules hors d'usage sont recyclés en Suisse chaque année, le potentiel de récupération des STM lors de leur recyclage est important. Dans le système de recyclage existant, une grande partie des EEE ne sont pas démontés et recyclés séparément lorsqu'un véhicule arrive en fin de vie. Les EEE qui n'ont pas été extraits au préalable sont traités avec la carcasse des véhicules dans des broyeurs. Après ce traitement, les STM contenus dans les EEE se concentrent dans la fraction légère du broyeur (RESH pour "Reststoffe Schredder", en allemand), qui est éliminée dans une usine d'incinération des déchets municipaux. La plus grande partie des STM contenus dans le RESH est alors perdue.

L'objectif du projet EVA II est de développer un système de surveillance pérenne du cycle de vie des EEE dans les véhicules ainsi que des STM qu'ils contiennent afin de soutenir l'implémentation de l'OREA. En particulier, il s'agit d'évaluer les coûts économiques et les bénéfices environnementaux d'un système dans lequel les EEE sont retirés avant le broyage du véhicule et recyclés séparément dans des installations de recyclage des déchets électroniques. Les résultats montrent que le coût du démontage et du recyclage séparé de tous les EEE est de l'ordre de 190 CHF par véhicule recyclé (ce qui correspond à environ 0,5% du prix de vente moyen d'une voiture neuve en Suisse en 2020). L'écobilan du recyclage séparé des EEE montre un bénéfice environnemental notable pour les catégories d'EEE "phares", "contrôleurs", et "actuateurs" par rapport au système de recyclage existant. Le plus grand bénéfice environnemental est obtenu par une meilleure récupération des métaux précieux contenus dans les circuits imprimés, la récupération de plexiglas (PMMA), ainsi qu'une réduction de la quantité de RESH à incinérer.

Le modèle développé dans le cadre du projet EVAII permet de simuler les scénarios futurs des flux de masse des EEE et de leurs STM dans le système de recyclage des véhicules en fin de vie. Ainsi, il est possible d'anticiper l'évolution du parc automobile suisse ainsi que les besoins et potentiels en terme de recyclage et peuvent servir d'outil d'aide à la décision pour les acteurs du secteur du recyclage automobile

En outre, afin d'évaluer la performance du système de recyclage des véhicules en terme de récupération des STM, un protocole d'échantillonnage et d'analyse des STM dans le RESH a été élaboré dans le cadre de du projet EVA II. Ce protocole peut aussi permettre de mettre en évidence l'amélioration de la récupération de STM engendrée par le recyclage séparé des EEE.

Executive summary

Modern cars contain a considerable amount of embedded electronic devices (EED). On average, the total mass of all EED is estimated at 30-50 kg per vehicle. In recent years, the number of these devices has increased significantly. Like "domestic" electronic devices (computers, telephones, printers, monitors, etc.), they are mainly composed of industrial metals (such as iron, aluminum or copper) as well as plastics, but also contain many scarce technology metals (STM) such as certain precious metals (gold, silver or platinum, for example), indium, lithium, germanium, neodymium or tantalum for example. Considering that the Swiss vehicle fleet is estimated at 4.7 million vehicles in 2020 and that more than 60,000 end-of-life vehicles are recycled in Switzerland each year, the potential for STM recovery through recycling is significant. In the existing recycling system, a large proportion of EED are not removed and recycled separately when a vehicle reaches its end of life. Instead EED still embedded in vehicles are treated together with the vehicle carcasses in car shredders. Following this treatment, STM contained in EED are concentrated in the shredder's light fraction (SLF), which is disposed of in a municipal waste incineration plant. Most of the STM contained in the SLF are lost in the process.

The goal of the EVA II project is to develop a perennial monitoring system for the life cycle of EED and the STMs they contain in order to support the implementation of the VREG. In particular, the economic costs and environmental benefits of a system in which EED are removed prior to shredding end-of-life vehicles and recycled separately in e-waste recycling facilities is evaluated. The results show that the cost of removing and recycling separately all EED is about CHF 190 per recycled vehicle (which corresponds to about 0.5% of the average sales price of a new car in Switzerland in 2020). The LCA of separate EED recycling shows a significant environmental benefit for the EED categories "headlights", "controllers", and "actuators" compared to the existing recycling system. The greatest environmental benefit is achieved through better recovery of precious metals from printed circuit boards, recovery of Plexiglas (PMMA), and a reduction in the amount of waste to be incinerated.

The model developed in the frame of the project allow to simulate future scenarios of mass flows of EED and their STM in the recycling system of end-of-life vehicles in Switzerland. Thus, it is possible to anticipate the evolution of the Swiss car fleet as well as the needs and potentials in terms of recycling, and can thus be used as a decision support tool for the actors of the car recycling sector.

In addition, in order to assess the performance of the vehicle recycling system in terms of STM recovery, a protocol for sampling and analysis of STM in the SLF has been developed in the frame of the EVA II project. This protocol can also be used to demonstrate the improvement of STM recovery due to the separate recycling of EEE.

1 Einleitung

1.1 Kontext

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

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

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

Art. 1 Zweck

(...)

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

Art. 2 Gegenstand und Geltungsbereich

(...)

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

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

(...)

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

(...)

Art. 9 Entsorgungspflicht

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

Art 10 Anforderungen an die Entsorgung

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

(...)

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

1.2 Eingebettete elektronische Geräte und ihre Klassifizierung

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

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

Gerät	Gerätetyp	Geräteklasse	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			
 Hauptscheinwerfer ABAKUS 212-11K2L-LD-EM	 *Scheinwerfer (vorne und hinten)*	 „Scheinwerfer“	
 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 Geräteklasse "Steuergeräte" enthält auch die Geräteklasse "Aktuatoren" mehrere Gerätetypen. Die Geräteklasse "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 Geräteklassen 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 Bestandteilen wie kleine Elektromotoren, Magnetventilen und dergleichen Bewegungsfunktionen übernehmen, wie zum Beispiel der Fensterhebermotor.
- 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 welcher die anderen EEG miteinander verbindet, um Strom und Informationen zu übertragen.

Tabelle 1: Gerätekategorien und ihrer typischen Bestandteile und Zusammensetzungen

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

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

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

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

1.3 Seltene Technologiemetalle

Den seltenen Technologiemetallen (STM) werden Edel-, Seltenerd-, sowie weitere spezielle Metalle zugeordnet, die in der Erdkruste in niedrigen Gehalten vorhanden sind [1], [3]. STM besitzen

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

spezielle physikalische Eigenschaften, welche in verschiedenen Technologien, vor allem in der Elektronik, essentiell sind. Das macht sie in vielen Fällen unersetzlich und sie sind oft von hohem strategischem Wert. Die heutigen Rückgewinnungsquoten sind allerdings für viele der STM aufgrund technologischer und ökonomischer Hürden sehr tief [4]. Die VREG sieht in den Anforderungen an die Entsorgung ihre Rückgewinnung im Prinzip vor.

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

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

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

1.4 Bisherige Projekte

In den Jahren 2011 bis 2015 wurden im Auftrag des BAFU Vorabklärungen zur Verwertungspotenzial seltener Metalle aus der Automobilelektronik durchgeführt und publiziert:

- Verwertung seltener Metalle aus der Automobilelektronik in der Schweiz: Systemübersicht und Probenahmekonzept; Empa, 2. April 2012 [8]
- Verwertung seltener Metalle aus der Automobilelektronik in der Schweiz: Modul 2: Probenahme sowie Aufbereitung und Analyse; Modul 3: Auswertung und Diskussion der Resultate sowie Massnahmen zur Optimierung des Systems; Empa 2015 [9]

Daran anschliessend wurde 2016 unter Leitung des BAFU und mit Finanzierung durch SARS, AWEL und BAFU das Projekt Elektronik-Verwertung Altfahrzeuge (EVA, im Folgenden EVA I genannt) gestartet und 2018 abgeschlossen. Das Projekt befasste sich unter anderem mit STM Gehalt der EEG in Fahrzeugen, Experimenten zum Ausbuaufwand (Zeitmessungen) für die Demontage von EEG sowie einer Ökobilanz zu verschiedenen Recyclingszenarien einer Auswahl an Fokusgeräten.

Aus den umfangreichen Arbeiten resultierten diverse Berichte und wissenschaftliche Publikationen. Auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse konnten 12 Fokusgeräte bestimmt werden, bei welchen als Entscheidungskriterien für eine gesonderte Behandlung die Ausbuaufhäufigkeit, der Ausbuaufwand und der erzielte Umweltnutzen angewandt wurden [7], [10]–[17].

1.5 Ziel des Projekts EVA II

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

- A. Abschätzung der Kosten und des Umweltnutzens des Ausbaus und separaten Recyclings für jeden identifizierten Gerätetyp. Dies dient der Unterstützung des BAFU für die Festlegung des Geltungsbereichs der VREG in der Departementalen Verordnung. Diese wird eine Liste der Gerätetypen enthalten, die separat ausgebaut werden und gemäss den Anforderungen der VREG entsorgt werden müssen (sogenannte Ausbaugeräteliste). **(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 zusätzlich zum Synthesebericht die verschiedene weitere 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.

1.6 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].

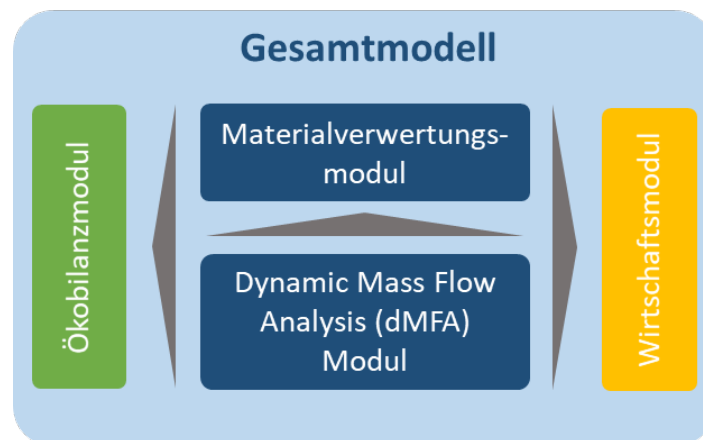


Abbildung 2: Konzeptuelle Architektur des Gesamtmodells (EVA II)

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.

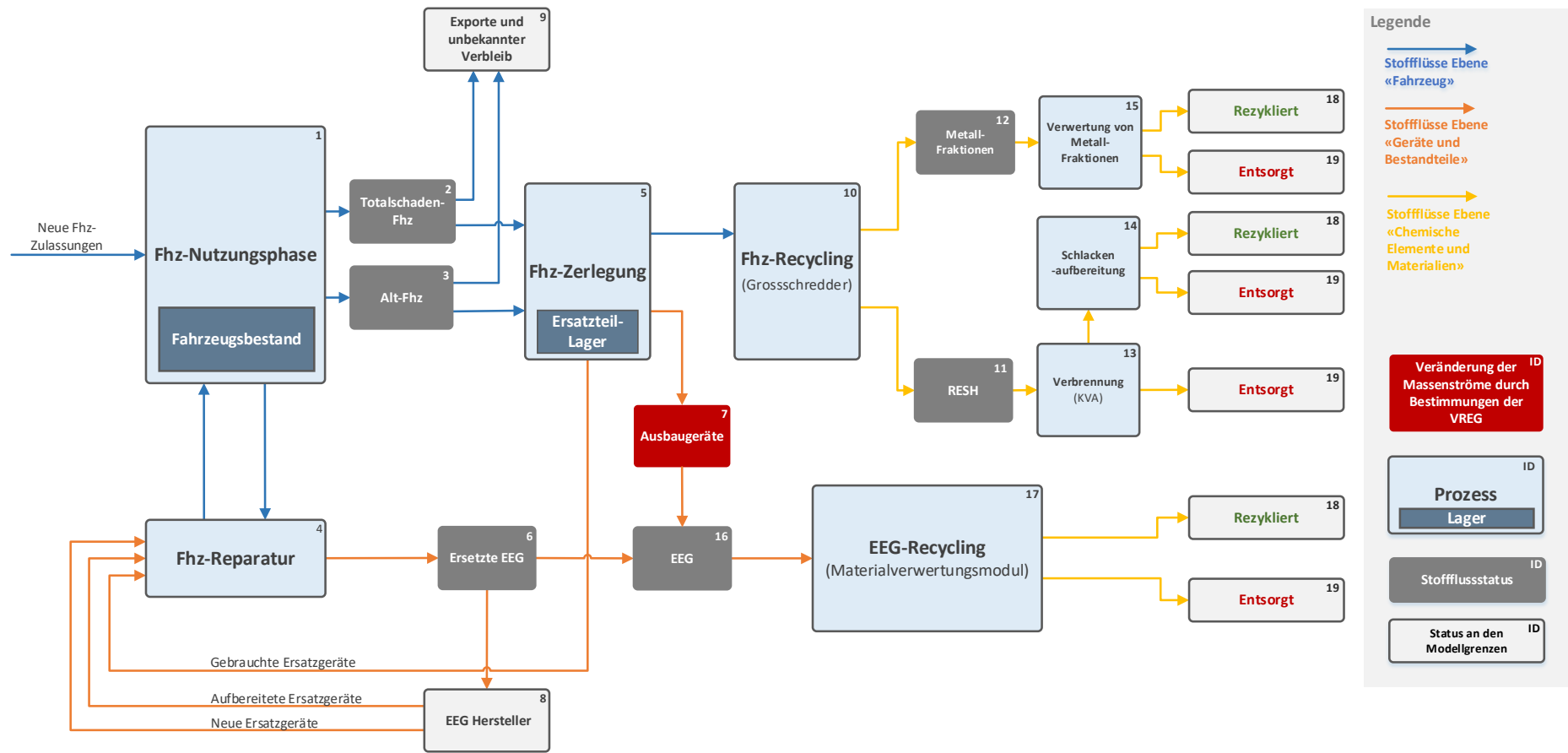


Abbildung 3: Übersicht über das modellierte schweizerische Altfahrzeugverwertungssystem

2 Kosten und Umweltnutzen des separaten Recyclings von EEG

2.1 Einleitung und Ziele

Seit dem Inkrafttreten der revidierten VREG müssen EEG separat rezykliert werden, wenn deren Ausbau verhältnismässig ist und deren stoffliche Verwertung gemäss dem Stand der Technik erfolgt. Der EEG Ausbau (inkl. dem separaten Recycling) muss gemäss VREG wirtschaftlich tragbar sowie ökologisch sinnvoll sein. Gerätetypen, welche diese Bedingungen erfüllen, sind Kandidaten für die Ausbaugeräteliste, welche in der departementalen Verordnung des UVEK festgelegt werden wird. Dies führt zu folgenden Forschungsfragen:

- Wie hoch ist der Umweltnutzen des Ausbaus und separaten Recyclings von EEG aus Fahrzeugen durch die Verwertung in auf Elektroschrott spezialisierten Anlagen gegenüber ihrer Behandlung zusammen mit dem Fahrzeug im Grossschredder?
- Wie hoch sind die Kosten, welche durch den Ausbau von EEG aus Fahrzeugen und die Verwertung in auf Elektroschrott spezialisierten Anlagen erzeugt werden?

Das Wirtschafts- sowie Ökobilanzmodul wurden entwickelt, um die Erfüllung dieser Anforderungen zu überprüfen und mögliche EEG als Kandidaten für die Liste zu identifizieren.

2.2 Methodik

2.2.1 Ansatz

Um die in 2.1 beschriebenen Forschungsfragen zu beantworten, wurden die Module des Gesamtmodells (siehe 1.6) verwendet: Das dmFA- sowie das Materialverwertungsmodul ermöglichen Massenflüsse zu bestimmen, welche im Wirtschafts- und Ökobilanzmodul analysiert werden, um Kosten und den Umweltnutzen zu ermitteln.

2.2.2 Das dynamisches Massenflussmodell (dmFA)- und Materialverwertungsmodul

Das dmFA- und Materialverwertungsmodul bilden den gesamte Fahrzeugs- und Gerätelebenszyklus sowie die darin enthaltenen chemischen Elemente in der Schweiz ab (siehe Abbildung 4). Die Menge der Fahrzeuge, die jedes Jahr Altfahrzeuge werden, wird mit Materialflussanalysen ermittelt. Die Massenströme im System werden auf verschiedenen Ebenen (Fahrzeug-, Gerät-, Bauteil- sowie Elementebene) modelliert.

Das dmFA Modul ermöglicht Zukunftsszenarien des Altfahrzeugstroms zu erstellen, da Fahrzeuge, welche heute in der Schweiz neu zugelassen werden, in 15-20 Jahren als Altfahrzeuge den Flottenbestand verlassen und rezykliert oder exportiert werden. Die Ergebnisse des dmFA Moduls fliessen in die anderen Module ein.

Im Materialverwertungsmodul werden anhand von Daten aus Experimenten³ sowie wissenschaftlicher Literatur Rückgewinnungspotenziale von Sekundärmaterialien für die Gerätetypen im Falle eines Ausbaus und separaten Recycling der EEG ermittelt.

Für die Vorkommen bestimmter Gerätetypen in Fahrzeugen wurde das durchschnittliche Vorkommen in einem Altfahrzeug basierend auf dem Altfahrzeugmix im Referenzjahr 2021 verwendet. Dieser besteht für 2021 noch zu 99% aus Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. EEG die exklusiv in Elektrofahrzeugen vorkommen haben noch keinen grossen Einfluss in der Analyse. Das Materialverwertungsmodul sollte deshalb in regelmässigen Abständen aktualisiert werden, da sich die Flotten- wie auch Altfahrzeugzusammensetzung in Zukunft verändern wird.

Abbildung 4 stellt die Integration des Materialverwertungsmoduls im Gesamtmodell dar. Die Geräte, die als Ausbaugeräte definiert wären, werden im Prozess 5 ausgebaut, bevor das Altfahrzeug in den Grossschredder gelangt. c

³ Ein Batchversuch, in welchem 10 Tonnen EEG in einer Elektroschrottreyclinganlage behandelt wurden, sowie ein Deep Dismantling Versuch, in welchem EEG in ihre Bestandteile zerlegt wurden.

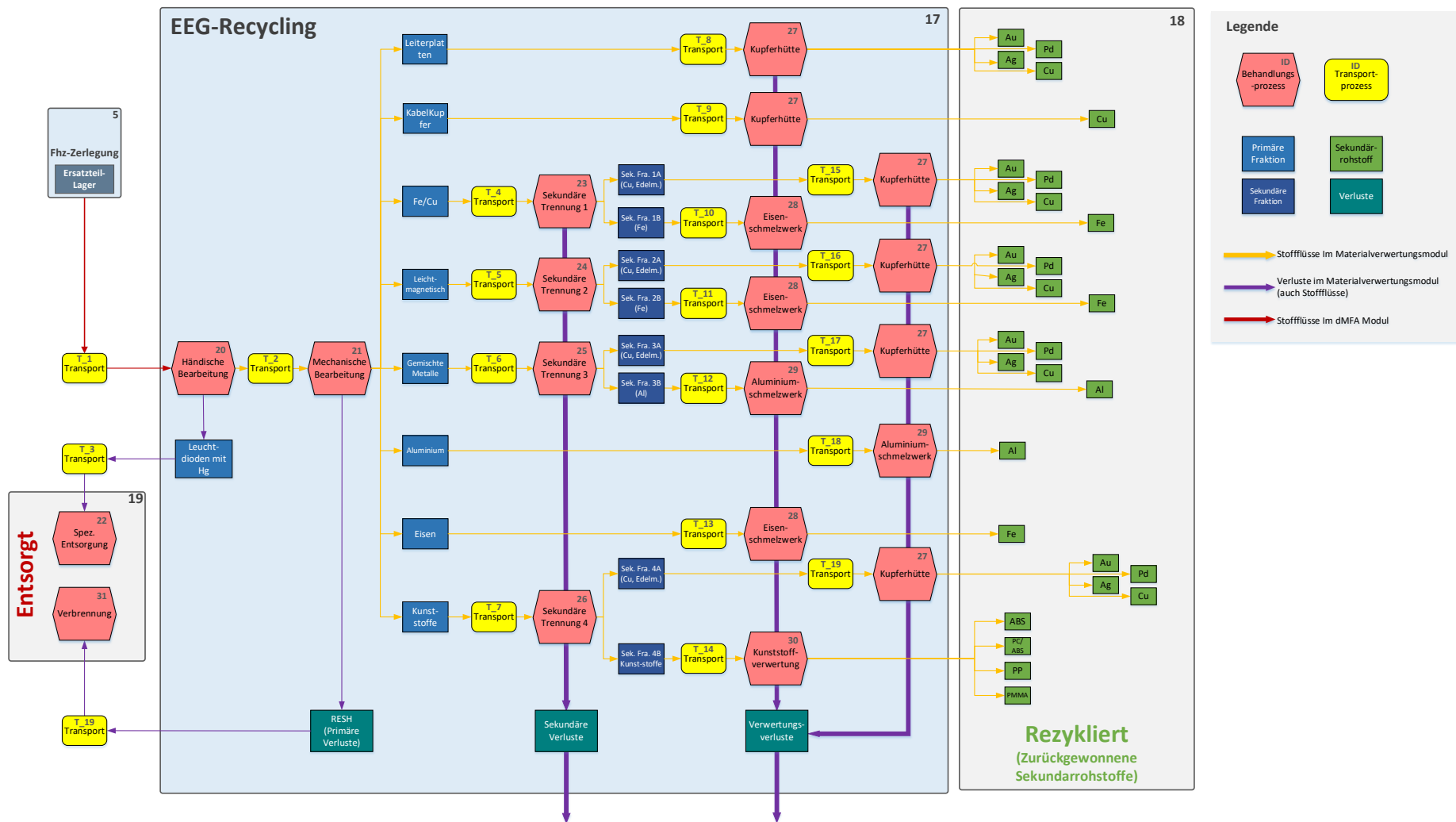


Abbildung 4: Struktur des Materialverwertungsmoduls

2.2.3 Das Wirtschaftsmodul

Das Wirtschaftsmodul beinhaltet die Modellierung der Kosten des Ausbaus und Recyclings der in den Fahrzeugen eingebetteten elektronischen Geräte. Das Modul umfasst die Demontage der Geräte, den Transport, sowie das Recycling. Es werden die Kosten des Ausbaus für alle in EVA II identifizierten Gerätetypen bestimmt. Die so ermittelten Kosten werden als Indikator für die Beurteilung der wirtschaftlichen Tragbarkeit des Ausbaus der identifizierten Gerätetypen verwendet.

Um den Ausbau und separaten Recycling der EEG zu modellieren, müssen die Gesamtkosten ermittelt werden. Im Wirtschaftsmodul wurden 3 Hauptkostenfaktoren identifiziert:

- **Demontage von EEG aus Altfahrzeugen:** Es wird angenommen, dass der der Fahrzeugverwerter den Ausbau der EEG gleichzeitig mit der Trockenlegung des Fahrzeugs vornimmt. Für die Ermittlung der Kosten der Demontage sind Daten zum Arbeitsaufwand und die durchschnittlichen Gerätemassen für die 43 identifizierten Gerätetypen notwendig. Der Anteil der Geräte, die für den Ersatzteilmarkt ausgebaut werden, wird berücksichtigt. Die benötigten Daten stammen aus verschiedenen Quellen: Aus Experimenten im Rahmen von EVA II und früheren Projekten, wissenschaftlicher Literatur, Interviews mit Experten aus der Branche, sowie Schätzungen [14], [20], [22].
- **Logistik:** Nachdem die EEG aus den Fahrzeugen entfernt sind, werden sie zu einer Elektroschrott-Recyclinganlage transportiert. Um die Kosten zu beurteilen, wurden die Preise für die Dienstleistungen und die von den Logistikunternehmen bzw. den Fahrzeugverwertern erhaltenen Informationen berücksichtigt.
- **Recycling:** In der Recyclinganlage werden die EEG rezykliert, um sekundäre Rohstoffe zu gewinnen. Um die Kosten dieses Schrittes zu bestimmen, lehnt sich das Modell an das Finanzierungssystem von SWICO an, da die Behandlungsprozesse von EEG identisch zu Geräten der Unterhaltungselektronik sind und der Wert der Outputfraktionen der im SWICO-System verwendeten "IT UE Rest" Kategorie entspricht. Die finanzielle Entschädigung, die den Recyclern für die Behandlung von SWICO-Geräten gewährt wird, berücksichtigt den ökonomischen Wert der Fraktionen, indem diese an den Gehalt der Basismetalle Kupfer, Eisen und Aluminium und deren internationalen Handelspreise gekoppelt werden. Aus diesem Grund werden die Erlöse aus dem Recycling ausschließlich den Recyclern zugerechnet und kompensieren teilweise die Kosten des Recyclings. Die Bruttokosten des Recyclings werden in diesem Modul nicht berechnet.

Die detaillierte Beschreibung des Wirtschaftsmoduls, einschliesslich aller Parameter, Datenquellen und Referenzen sowie mathematischer Gleichungen sind in einem separaten Bericht zusammengestellt. [20].

2.2.4 Das Ökobilanzmodul

Das Ökobilanzmodul beinhaltet die Modellierung des Szenarios "EEG Ausbau" (systematische Entfernung jedes Gerätetyps und getrenntes Recycling der EEG in einer Elektroschrottrecyclinganlage) und des Szenarios "Baseline" (bestehendes Altfahrzeug-Recyclingsystem). Analog zum Wirtschaftsmodul reicht die Systemgrenze des Ökobilanzmoduls von der Demontage der Geräte über die mechanische Behandlung bis zur Rückgewinnung von Materialien wie beispielsweise sekundärem Kupfer in einer Kupferhütte. Der Ausbau und separaten Recycling eines Gerätetyps (Szenario "EEG Ausbau") wird mit der Situation ohne Ausbau (Szenario "Baseline") durch Simulationen mit dem Ökobilanzmodul verglichen. Dieser Vorgang wird für alle in EVA II identifizierten Gerätetypen wiederholt. Der modellierte Umweltnutzen wird als Beurteilungsgrundlage für die Anforderung der VREG nach der ökologischen Sinnhaftigkeit des Szenarios "EEG Ausbau" verwendet.

Für die Beurteilung des Umweltnutzens werden folgende Annahmen getroffen:

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

Durch den Szenario "EEG Ausbau" können Sekundärmaterialien zurückgewonnen (wodurch die Produktion von Primärmaterialien und die damit verbundenen Umweltauswirkungen vermieden werden) und der Anteil, der in der KVA thermisch verwerteten Materialien gegenüber dem Szenario "Baseline" verringert werden. Ist der Netto-Umweltnutzen positiv, kann den Szenario "EEG Ausbau" als ökologisch sinnvoller gegenüber dem Szenario "Baseline" bezeichnet werden.

Für die Ökobilanz wurden die oft benutzen Bewertungsmethoden "Global Warming Potential", "Methode der Ökologischen Knappheit (Umweltbelastungspunkte 2021 oder UBP21)" sowie "Environmental Footprint (EF3.0)" verwendet (Resultate mit EF3.0 sind in diesem Bericht nicht dargestellt). Gemeinsam ergeben sie eine umfassende Bewertung der Umwelteinflüsse, die durch die Recyclingaktivitäten sowie die Rückgewinnung sekundärer Ressourcen verursacht wird.

Die in der Ökobilanz betrachteten Materialien sind in Tabelle 4 zusammengestellt und entsprechen weitgehend den im heutigen Elektroschrottrecyclingsystem zurückgewonnenen Materialien. Mit der Entwicklung neuer Rückgewinnungsverfahren können weitere in EEG enthaltene seltene Technologiemetalle wie z.B. Neodym hinzugeführt werden.

Tabelle 4: Im Modul berücksichtigte Materialien

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

Für die Ökobilanz wird folgende funktionelle Einheit verwendet:

1 kg Eingebettetes Elektronisches Gerät (EEG)

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

Tabelle 5 stellt die Übersicht der verwendeten Daten dar, welche für die Ökobilanzanalyse benötigt werden.

Tabelle 5: Übersicht der im Ökobilanzmodul verwendeten Daten und deren Quellen

Beschreibung	Quellen
Umwelteinflüsse der Behandlungs- sowie Transportprozesse sowie der Substitution von Primärmaterialien	Ecoinvent (Version 3.8) [26]
Zusammensetzungen der EEG, Auftrennung der Gerätekategorien in die im heutigen Recyclingsystem relevanten Materialfraktionen	Resultate aus EVA I, Experimente aus EVA II [2], [7], [10]–[14], [22]
Transferkoeffizienten, welche die Anteile der Materialien in den Behandlungs- und Transportprozessen definieren	Materialverwertungsmodul [23]
Transportdaten, welche die Distanzen sowie Art des Transports der verschiedenen Transportprozesse bestimmen	Austausch mit Recyclingbetrieben, Abschätzungen [27]–[30]
Materialrückgewinnungsquoten, welche die technisch möglichen Rückgewinnungsquoten von Metallen und Kunststoffen festlegt, um die Menge der verlorenen bzw. zurückgewonnenen Materialien zu bestimmen	Resultate aus EVA I, Materialverwertungsmodul (EVA II) [7], [10], [13], [14], [19], [22]

Für die detaillierte Beschreibung des Ökobilanzmoduls, einschliesslich aller Behandlungs- wie Transportprozesse sowie der mathematischen Gleichungen, kann der entsprechende Bericht eingesehen werden [21].

2.2.5 Limitierungen der Module

Der Aussagekraft des Ökobilanz- und des Wirtschaftsmoduls sind folgende Grenzen gesetzt:

- Bei einzelnen Gerätetypen fehlen experimentelle Daten zum durchschnittlichen Anzahl dieser Geräte pro Fahrzeug. Um diesen Mangel auszugleichen, wurden Abschätzungen auf der Basis von Vergleichen mit ähnlichen Gerätetypen oder Eigenschaften vorgenommen. Die Qualität der Datenlage von jedem Gerätetyp wird in den Ergebnissen dargestellt.
- Das Wirtschafts- sowie das Ökobilanzmodul stellen eine Vereinfachung der Realität dar. Damit kann nicht die gesamte Vielfalt der verschiedenen Geräte aller Fahrzeugmodelle und Marken abgebildet werden, welche je nach Grösse und Preisklasse des Fahrzeugs stark unterschiedlich sein können.
- Sensoren wurden in dieser Studie nicht analysiert
- Die Analyse umfasst nur Materialien, für welche im heutigen System Rückgewinnungsverfahren existieren. Einzelne seltene Technologiemetalle wie Neodym, welche ebenfalls in EEG enthalten sind, können nicht in die Analyse einbezogen werden.
- Die Berechnung der Kosten im Wirtschaftsmodul stellt eine Momentaufnahme dar. Die Erlöse und somit Nettokosten für Recyclingbetriebe sind stark abhängig von Rohstoffpreisen sowie der Zusammensetzung der in den Fahrzeugen enthaltenen EEG. Aus dieser Unsicherheit soll die vorliegende Kostenberechnung als ungefähre Schätzung interpretiert werden um die Grössenordnung der verschiedenen Kosten zu verstehen.
- Quecksilberhaltige Dioden wurden nicht berücksichtigt. Allerdings enthält nur ein Teil der Scheinwerfer Quecksilber. Zudem ist nicht bekannt, was im heutigen Altfahrzeugrecyclingsystem mit dem Quecksilber geschieht. Dies macht. Das Szenario "EEG-Ausbau" hat aber im Prinzip für die Scheinwerfer den Vorteil, dass Quecksilber abgeschieden und fachgerecht entsorgt wird. Dieser Effekt wurde allerdings im Ökobilanzmodul nicht quantifiziert, weil einen Vergleich mit dem entwickelten Szenario "EEG Ausbau" aus diese Gründe schwierig ist
- Die Ergebnisse hängen davon ab, wie gut der EEG-Recyclingprozess im Materialverwertungsmodul modelliert wird, sowie davon, wie gut das dmFA-Modul die Fahrzeug- und EEG-Massenflüsse im Autorecyclingsystem modelliert. Die Limitierungen die verschiedenen Module gelten somit auch für das Gesamtmodell.
- Die Ergebnisse des Gesamtmodells sind nur so lange gültig, wie die Inputdaten die Realität korrekt wiedergeben. Für zukünftige Verwendungen des Gesamtmodells müssen die Inputdaten eventuell aktualisiert werden.

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Ergebnisse des Wirtschaftsmoduls

Die Ergebnisse der Kostenmodellierung zeigen, dass die Ausbaurkosten für alle EEG den grössten Anteil an den Gesamtkosten des Ausbaus und separaten Recycling darstellen. Dies ist auf die hohen Arbeitskosten in der Schweiz und den Aufwand des Ausbaus zurückzuführen. Eine wichtige Konsequenz der Methodik des Wirtschaftsmoduls ist aber, dass die Erlöse aus dem Recycling ausschließlich den Recyclern zugerechnet werden, und so teilweise die Kosten des Recyclings kompensieren. Die Bruttokosten⁴ des Recyclings werden in diesem Modul nicht berechnet. Abbildung 5 zeigt die Kosten auf Ebene Gerätekategorie. Die Kosten des Ausbau und separaten Recycling jedes Gerätetyps pro Fahrzeug sind in Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 12 aufgezeigt. Der Ausbau und separaten Recycling aller EEG eines durchschnittlichen Fahrzeugs wird auf 190 CHF geschätzt. Inputparameter und rohe Ergebnisse der Materialbewertungs-, Wirtschafts- und Ökobilanzmodule sind im Anhang C und Anhang D gezeigt.

Die Kosten des Ausbaus und separaten Recyclings jedes Gerätetyps pro durchschnittlichem Alt-Fahrzeug beträgt in der Regel weniger als 10 CHF, mit einzelnen Ausreissern wie dem Fensterhebermotor, der Lufteinspritzpumpe sowie dem Verteilergetriebe mit Kosten von über 20 CHF. EEG sind meist frei von Schadstoffen (mit Ausnahme von Scheinwerfern, die Hg-haltige Dioden enthalten können). Der Entfrachtungsschritt ist allerdings in der Schätzung der Recyclingkosten für alle Gerätekategorien enthalten. Die wahren Kosten könnten daher für Steuergeräte, Aktuatoren und Kabel kleiner sein. Zudem enthalten Steuergeräte signifikante Mengen an Wertstoffen wie Gold und Silber, die einen wichtigen Teil der Erträge des Recyclers ausmachen.

⁴ alle Kosten für die Durchführung des Recyclings (Personalkosten, Energie, Infrastruktur, Transport usw.), ohne Berücksichtigung der erhaltenen Erlöse (Verkauf von Sekundärrohstoffen).

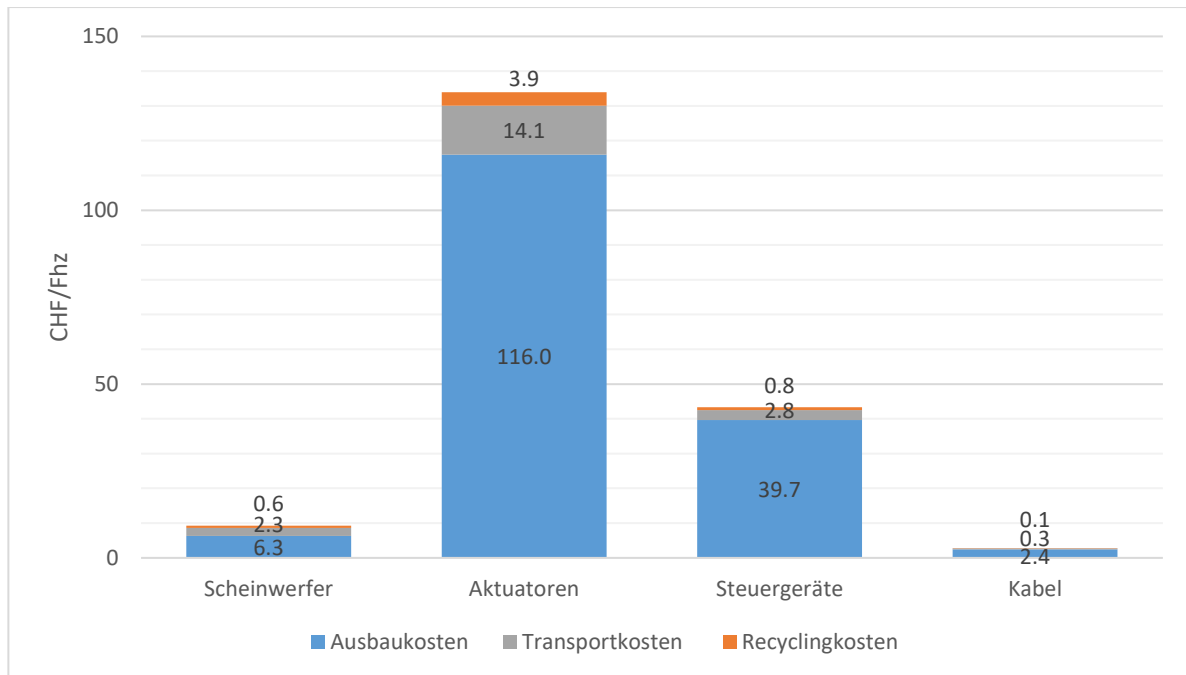


Abbildung 5: Kosten für die Gesamtmasse der EEG einer Gerätekategorie pro Fahrzeug. Die Erlöse aus dem Recycling werden ausschliesslich den Recyclingbetrieben zugerechnet. Somit kann ein Teil der Recyclingkosten kompensiert werden. Die Recyclingkosten in der Abbildung stellen die verbleibenden Kosten nach Abzug der Erlöse dar

2.3.2 Ergebnisse des Ökobilanzmoduls

Abbildung 6 stellt die Ökobilanzanalysen für die vier Gerätekategorien pro funktionelle Einheit für CO₂ Emissionen (GWP) sowie Umweltbelastungspunkte (UBP) dar.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Szenario "EEG Ausbau" gegenüber dem heutigen Altfahrzeugrecyclingsystem der Schweiz für alle Gerätekategorien (Szenario "Baseline"), mit Ausnahme der Kategorie "Kabel"⁵, ökologisch sinnvoll ist. Der mit dem Szenario "EEG Ausbau" erzielte Umweltnutzen durch die Rückgewinnung von Rohstoffen ist deutlich höher als der mit den Recyclingprozessen verursachte Umweltbelastung (siehe Abbildung 6).

Die Verbrennung der für die Rückgewinnung ungeeigneten Fraktionen sowie Rückgewinnungsprozesse wie das Einschmelzen von Metallfraktionen verursachen während der Behandlung die grössten Umweltbelastungen. Die Prozesse des Ausbaus, des Transports wie auch der mechanischen Vorbehandlung verursachen nur geringe Umwelteinflüsse.

Der höhere Umweltnutzen des Szenarios "EEG Ausbau" gegenüber des Szenarios "Baseline" ist je nach Gerätekategorie unterschiedlich (siehe Abbildung 7). Für die Gerätekategorie Aktuatoren resultiert nur ein gering höherer Umweltnutzen, da bereits im Szenario "Baseline" die Basismetalle

⁵ Für die Kategorie "Kabel" wird durch den Ausbau keine höhere Rückgewinnung des enthaltenen Kupfers erwartet. Die übrigen Bestandteile der Kategorie "Kabel" enthalten Kunststoffe, welche in beiden Szenarien nicht für das Recycling geeignet sind.

Eisen, Aluminium und ein Teil des Kupfers zurückgewonnen werden. Für die Kategorien Steuergeräte und Scheinwerfer kann durch den Ausbau und das separate EEG Recycling durch die verbesserte Rückgewinnung von Edelmetallen wie Gold, Silber und Palladium eine deutliche Erhöhung des Umweltnutzens erreicht werden. Zudem ermöglicht der Szenario "EEG Ausbau" die Rückgewinnung von hochwertigen Kunststoffen. In Bezug auf eingesparte CO₂ Emissionen (GWP) resultiert für Scheinwerfer die stärkste Verbesserung durch die Rückgewinnung von Kunststoffen aus Scheinwerfern. Bei einer Gesamtbewertung mit der Methode der Ökologischen Knappheit ist der Zusatznutzen bei Steuergeräten ähnlich hoch wie derjenige bei den Scheinwerfern. Dies ist auf die höheren Gehalte an Edelmetallen sowie Kupfer in den Steuergeräten zurückzuführen. In der Bewertung mit UBP sind die giftigen Substanzen, welche beispielsweise bei der Produktion der Edelmetalle benötigt werden sowie die Toxizität von Kupfer in der Umwelt, im Vergleich mit der GWP Methode zusätzlich integriert.

Im Ökobilanzmodul sind die seltenen Erden Neodym und Dysprosium nicht berücksichtigt, da die industriellen Kapazitäten zu ihrer Rückgewinnung in Europa derzeit nicht vorhanden sind. Durch die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte wird die Verwendung dieser Metalle in Zukunft jedoch stark zunehmen (siehe Kapitel 3), und sie werden wirtschaftlich und ökologisch relevant werden. Im Ökobilanzmodul ist auch Quecksilber nicht berücksichtigt, ein hochbelastender Schadstoff, der in bestimmten Scheinwerfertypen enthalten ist. Der Verbleib von Hg im heutigen Altfahrzeugsystem ist nicht bekannt. Zusätzlich enthält nur ein Teil der Scheinwerfer Hg. Das getrennte Recycling von Scheinwerfern ermöglicht, die Hg-haltigen Dioden umweltgerecht zu entsorgen, was im Vergleich zum Szenario "Baseline" zu zusätzlichem Umweltnutzen führen würde.

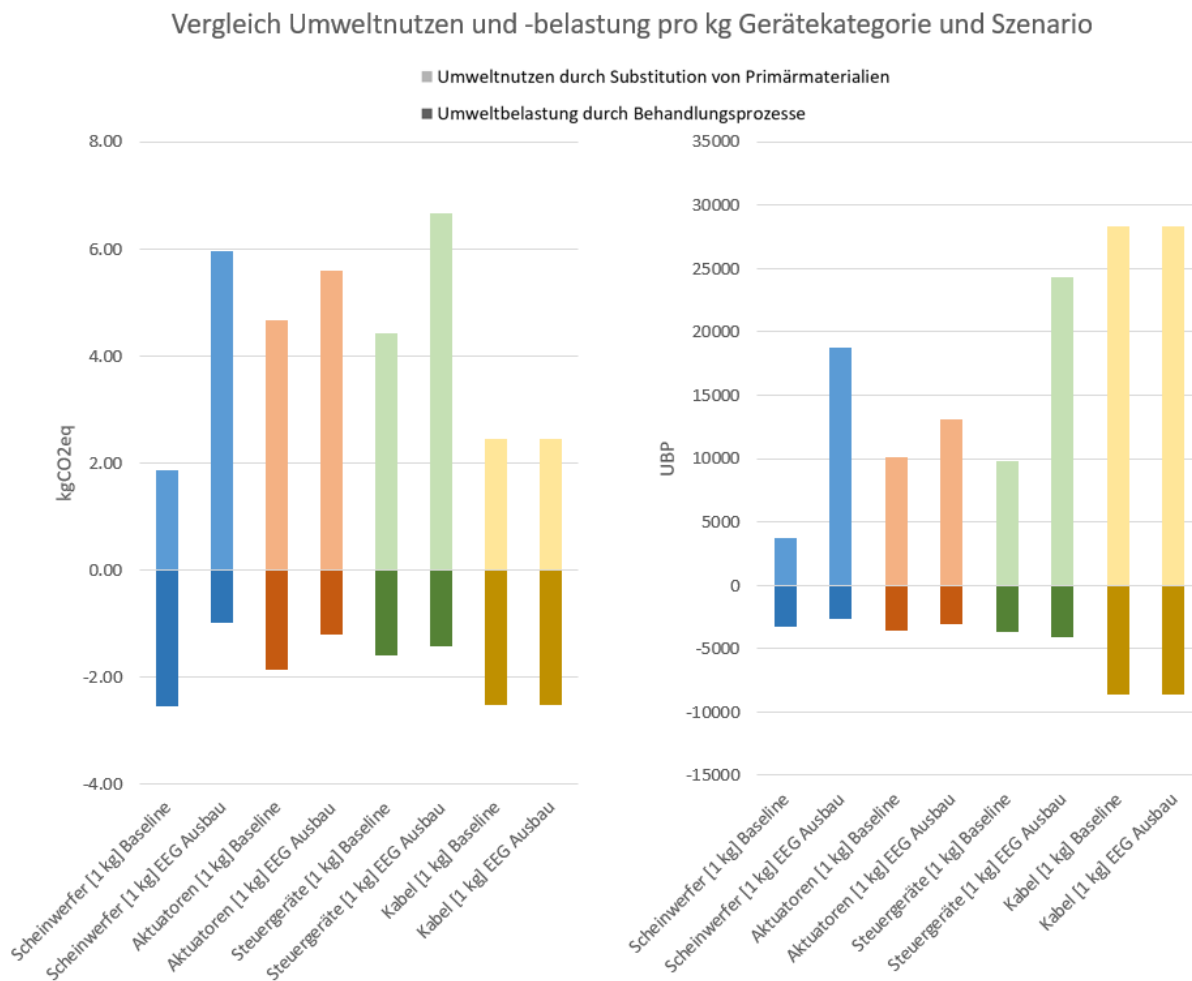


Abbildung 6: Vergleich von Umweltnutzen (helle Balken) und -belastung (dunkle Balken) nach Szenario und Gerätekategorie für GWP & UBP pro kg Gerätekategorie

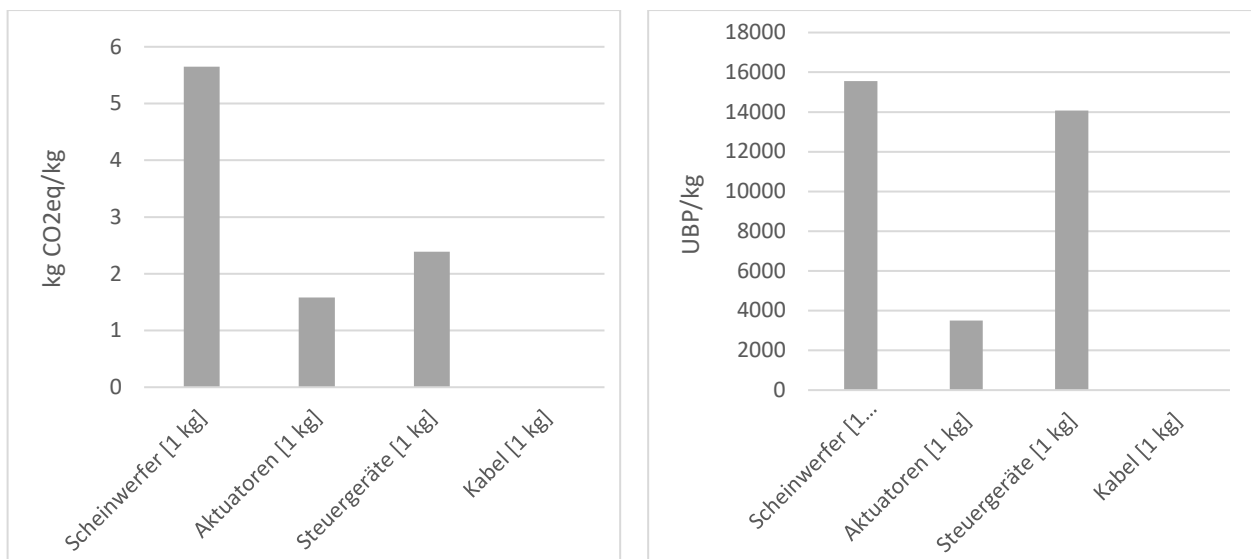


Abbildung 7: Unterschied zwischen den Umweltnutzen (für GWP & UBP) des Szenarios "EEG Ausbau" und des Szenarios "Baseline", pro kg jeder Gerätekategorie. Dies zeigt den Netto-Umweltnutzen von EEG-Ausbau und -Recycling im Vergleich zur aktuellen Situation.

Anhand der oben dargestellten Ergebnisse, die die Umweltbelastung pro kg EEG für jede Gerätekategorie beschreiben, lässt sich die Umweltbelastung eines in der Schweiz rezyklierten durchschnittlichen Altfahrzeug berechnen. Dazu wird die durchschnittliche EEG-Masse pro Fahrzeug für jede Gerätekategorie berücksichtigt. Im durchschnittlichen Altfahrzeug (im Referenzjahr 2021) befinden sich insgesamt 40 kg EEG, davon 8.90 kg Scheinwerfer, 19.87 kg Aktuatoren, 9.95 kg Steuergeräte sowie 1.3 kg Kabel. Da die Masse der verschiedenen Gerätekategorien pro Fahrzeug unterschiedlich ist, ist es zur Abschätzung des tatsächlichen Umweltnutzens des Ausbaus und separaten Recycling der EEG erforderlich, ein durchschnittliches rezykliertes Altfahrzeug als Vergleichsmaßstab heranzuziehen und nicht ein Kilogramm an Geräten.

Abbildung 8 zeigt den Umweltnutzen aufgrund einer Umstellung vom Szenario "Baseline" zum Szenario "EEG Ausbau" für die Gerätemassen der Gerätekategorien anhand der CO₂ Emissionen (GWP) und der UBP pro Fahrzeug ". Der höchste Umweltnutzen im Szenario "EEG Ausbau" wird bei den Scheinwerfern erzielt. Bei der Betrachtung mit UBP ist für die Gesamtmasse der Steuergeräte der grösste zusätzliche Umweltnutzen zu erzielen.

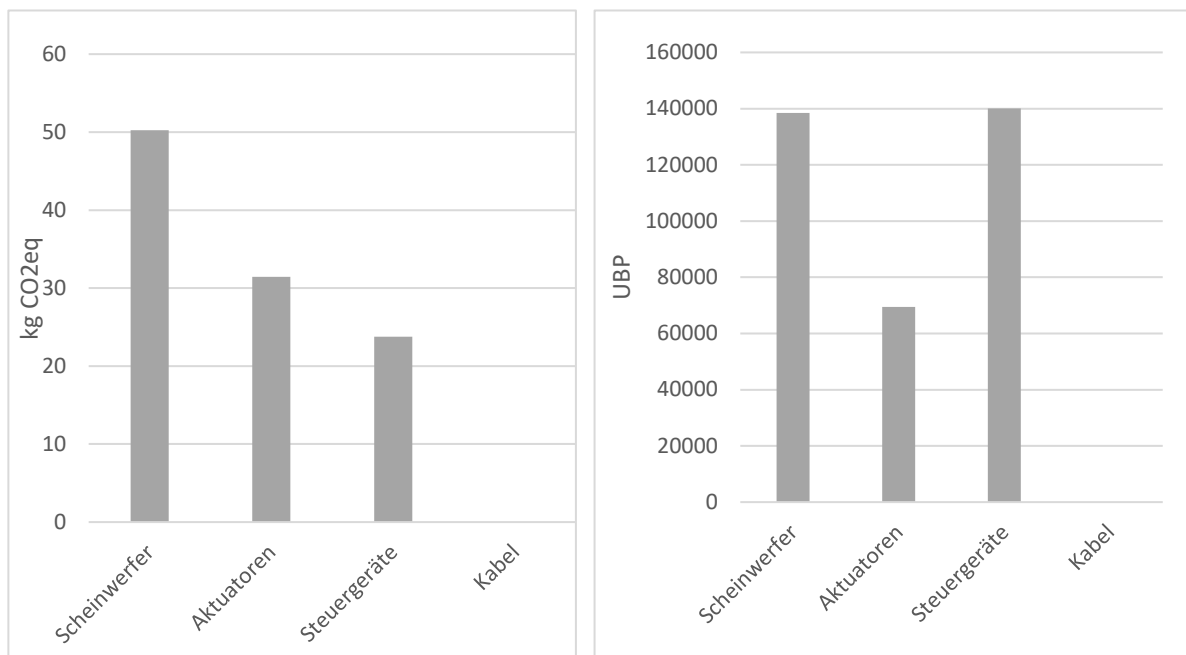


Abbildung 8: Umweltnutzen erzeugt aufgrund einer Umstellung vom Szenario "Baseline" zum Szenario "EEG Ausbau" für Gesamtmasse EEG pro Fahrzeug jeder Gerätekategorie

2.3.3 Kombination der Ergebnisse vom Wirtschafts- und Ökobilanzmodul

In den Abbildungen 9 - 11 sind für jeden Gerätetyp der Netto-Umweltnutzen eines Wechsels vom Szenario "Baseline" zum Szenario "EEG Ausbau" sowie die dadurch entstehenden zusätzlichen Kosten pro durchschnittlichem in der Schweiz recyceltem Altfahrzeug dargestellt.

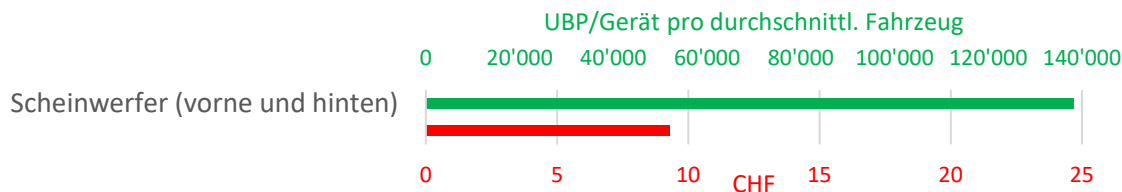


Abbildung 9: Kosten und Umweltnutzen (UBP) pro Gerätetyp verursacht durch einen Wechsel vom Szenario "Baseline" zum Szenario "EEG Ausbau" (Achtung: 1) andere UBP Skala bei Scheinwerfern, 2) Wert für Gesamtmasse aller 4 Scheinwerfer (2 Front- und 2 Rückscheinwerfer) eines Fahrzeugs) (Teil 1/3)

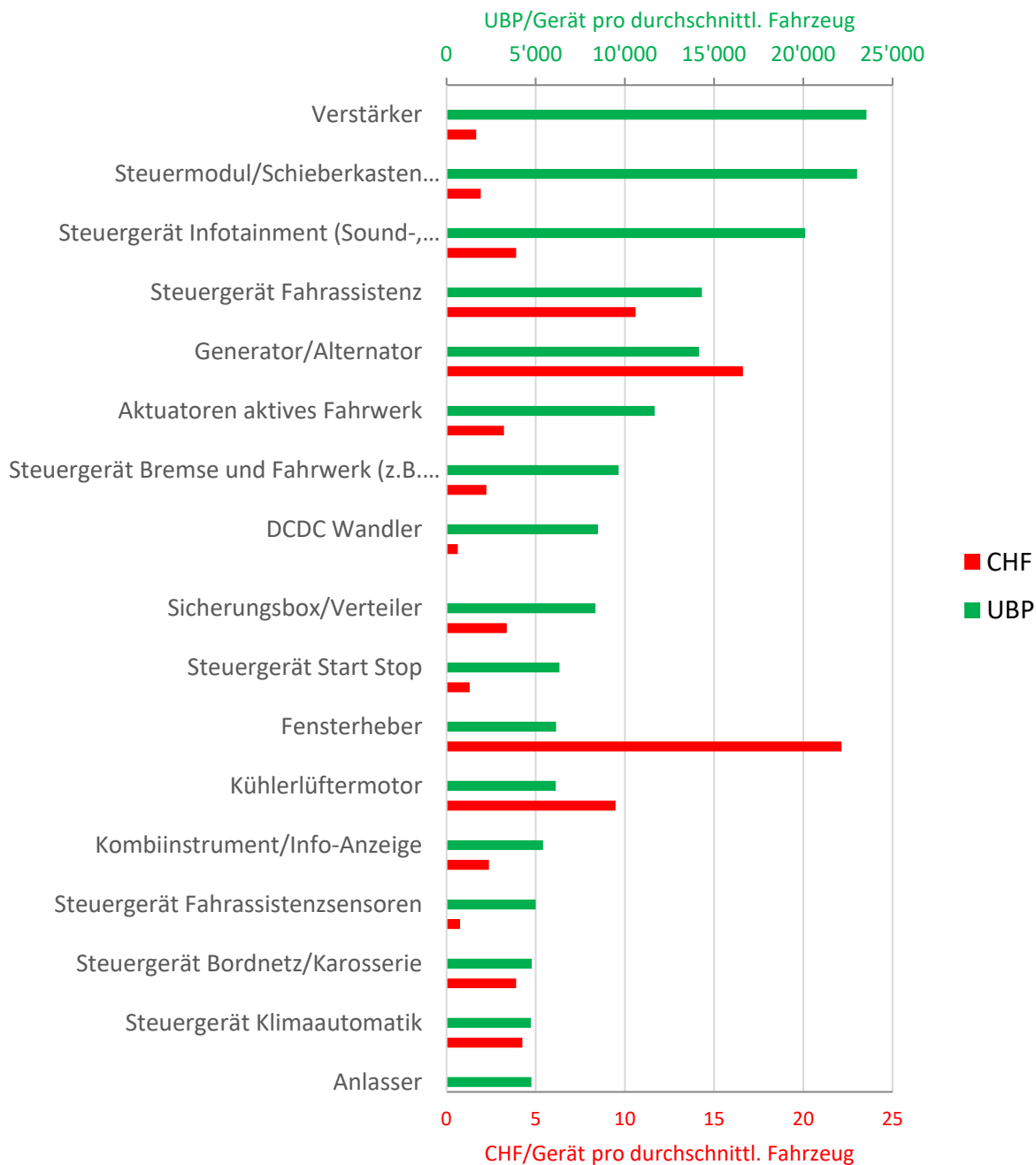


Abbildung 10: Kosten und Umweltnutzen (UBP) pro Gerätetyp verursacht durch einen Wechsel vom Szenario "Baseline" zum Szenario "EEG Ausbau" (Teil 2/3)

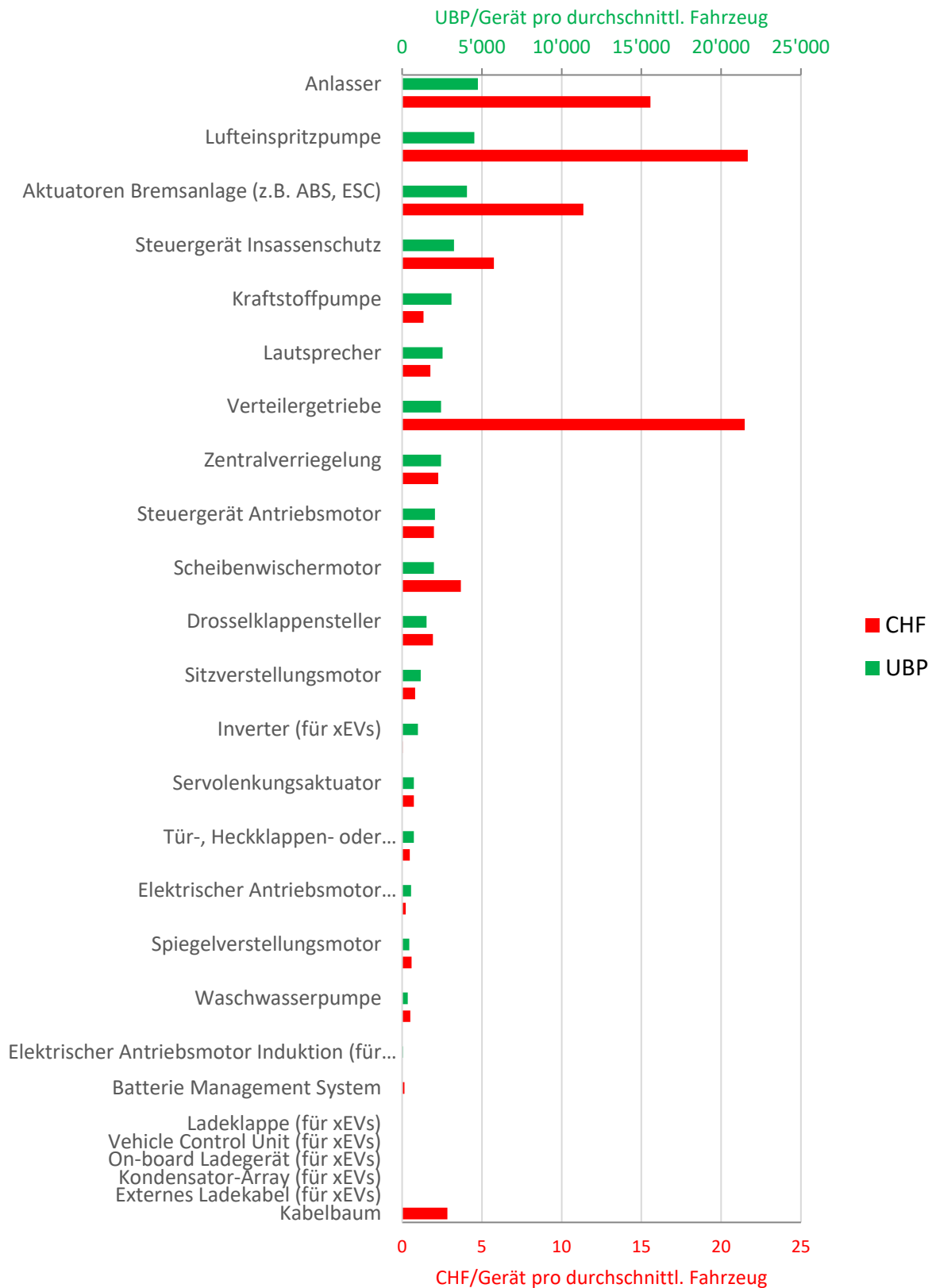


Abbildung 11: Kosten und Umweltutzen (UBP) pro Gerätetyp verursacht durch einen Wechsel vom Szenario "Baseline" zum Szenario "EEG Ausbau" (Teil 3/3)

Um die Ergebnisse der Modellierung der Kosten (Wirtschaftsmodul) sowie wie des Umweltnutzens und der Umwelteinflüsse (Ökobilanzmodul) eines jeden Gerätetyps zusammenzuführen, wurde eine Rangierung mit folgenden Elementen durchgeführt:

- Normalisierung der Resultate nach UBP sowie der Kosten pro Gerätetyp. Dies führt zu einer Verteilung zwischen 0 und 1 für UBP und Kosten pro Gerätetyp. Der Wert 1 entspricht dem höchsten Umweltnutzen beziehungsweise den tiefsten Kosten.
- Berechnung des gewichteten Mittelwerts der normalisierten Umwelt- sowie Kostenresultate der Gerätetypen. Dies liefert die Gesamtbewertung für jeden Gerätetyp. Mit unterschiedlicher oder gleicher Gewichtung der ökologischen und wirtschaftlichen Perspektive würde entsprechend eine andere Rangierung resultieren.
- Klassierung von hoch nach tief. Der Gerätetyp mit dem höchsten Wert (nahe 1) erzielt aus wirtschaftlicher wie ökologischer Perspektive den höchsten Mehrwert.

In Tabelle 6 ist die Klassierung der verschiedenen Gerätetypen bei gleicher Gewichtung von ökologischen und wirtschaftlichen Bewertungen dargestellt. Die Methodik zur Qualität der Datenlage ist in Tabelle 7 weiter erläutert.

Tabelle 6: Klassierung der Gerätetypen bei gleicher Gewichtung der ökologischen und wirtschaftlichen Perspektive

Gerätetyp ⁶	Kategorie	ID	Normalisierter UBP Wert	Normalisierter Kostenwert	Gesamte Bewertung	Qualität Daten
Scheinwerfer (vorne und hinten)	Scheinwerfer	20	1.00	0.58	0.790	+++
Verstärker	Steuergerät	34	0.19	0.93	0.558	+
Steuermodul/Schieberkasten automatisches Getriebe	Steuergerät	31	0.19	0.91	0.550	++
DCDC Wandler	Steuergerät	06	0.07	0.97	0.520	+
Inverter (für xEVs)	Steuergerät	11	0.01	1.00	0.503	+
Steuergerät Fahrassistentensensoren	Steuergerät	27	0.04	0.97	0.503	+++
Ladeklappe (für xEVs)	Aktuator	36	0.00	1.00	0.500	(+)
Elektrischer Antriebsmotor Induktion (für xEVs)	Aktuator	07	0.00	1.00	0.500	(+)
Elektrischer Antriebsmotor Permanentmagnet (für xEVs)	Aktuator	08	0.00	0.99	0.497	(+)
Batterie Management System	Aktuator	04	0.00	0.99	0.497	(+)

⁶ (xEV = Fahrzeuge mit Elektroantrieb)

Gerätetyp ⁶	Kategorie	ID	Normalisierter UBP Wert	Normalisierter Kostenwert	Gesamte Bewertung	Qualität Daten
Steuergerät Start Stop	Steuergerät	40	0.05	0.94	0.497	+
Steuergerät Info- tainment (Sound-, Navi-, und Multi- media)	Steuergerät	28	0.16	0.82	0.494	+++
Tür-, Heckklap- pen- oder Schie- bedachmotor	Aktuator	37	0.01	0.98	0.492	+
Waschwasser- pumpe	Aktuator	32	0.00	0.98	0.490	++
Steuergerät Brems- und Fahr- werk (z.B. ABS, ESC)	Steuergerät	25	0.08	0.90	0.489	(+)
Spiegelverstel- lungsmotor	Aktuator	39	0.00	0.97	0.488	(+)
Servolenkungsak- tuator	Aktuator	38	0.01	0.97	0.486	+++
Sitzverstellungs- motor	Aktuator	22	0.01	0.96	0.486	++
Kraftstoffpumpe	Aktuator	14	0.02	0.94	0.481	++
Aktuatoren aktives Fahrwerk	Aktuator	01	0.09	0.85	0.470	+
Lautsprecher	Aktuator	16	0.02	0.92	0.470	+++
Kombiinstru- ment/Info-An- zeige	Steuergerät	12	0.04	0.89	0.468	+++
Steuergerät An- triebsmotor	Steuergerät	23	0.02	0.91	0.463	+++
Drosselklappens- teller	Aktuator	05	0.01	0.91	0.462	++
Sicherungs- box/Verteiler	Steuergerät	21	0.07	0.85	0.458	++
Zentralverriege- lung	Aktuator	33	0.02	0.90	0.458	+++
Kabelbaum	Kabel	13	0.00	0.87	0.436	+++
Steuergerät Bord- netz/Karosserie	Steuergerät	24	0.04	0.82	0.431	+++
Scheibenwischer- motor	Aktuator	19	0.01	0.83	0.424	+++
Steuergerät Klimaautomatik	Steuergerät	30	0.04	0.81	0.423	+++
Steuergerät Insas- sensschutz	Steuergerät	29	0.03	0.74	0.383	+++
Steuergerät Fahr- assistenz	Steuergerät	26	0.12	0.52	0.319	+++
Kühlerlüftermotor	Aktuator	15	0.05	0.57	0.309	+++

Gerätetyp ⁶	Kategorie	ID	Normalisierter UBP Wert	Normalisierter Kostenwert	Gesamte Bewertung	Qualität Daten
Aktuatoren Bremsanlage (z.B. ABS, ESC)	Aktuator	02	0.03	0.49	0.258	+++
Generator/Alternator	Aktuator	10	0.10	0.25	0.177	+++
Anlasser	Aktuator	03	0.04	0.30	0.166	+++
Lufteinspritzpumpe	Aktuator	35	0.03	0.02	0.027	(+)
Verteilergetriebe	Aktuator	42	0.02	0.03	0.024	(+)
Fensterheber	Aktuator	09	0.05	0.00	0.023	+++
On-board Ladegerät (für xEVs)	Steuergerät	17			mangelnde Daten	
Externes Ladekabel (für xEVs)	Kabel	18			mangelnde Daten	
Kondensator-Array (für xEVs)	Steuergerät	41			mangelnde Daten	
Vehicle Control Unit (für xEVs)	Steuergerät	43			mangelnde Daten	

Tabelle 7: Legende zur Qualität der Datenlage

Symbol	Erklärung	Bewertung
(+)	keine Datenpunkte, aber Einschätzung möglich	Unsichere Datenlage
+	1-5 Datenpunkte	Mittlere Sicherheit Datenlage
++	5-10 Datenpunkte	Gute Datenlage
+++	>10 Datenpunkte	Sehr gute Datenlage

Gerätetypen, bei denen der Ausbau und das separate Recycling einen hohen Umweltnutzen pro EEG aufweisen, die aber in heutigen Altfahrzeugen nur selten vorkommen (z. B. Geräte, die ausschließlich in Elektrofahrzeugen zu finden sind), erhalten mit dieser Methode eine sehr niedrige Umweltnutzen. Aus demselben Grund sind die Kosten pro durchschnittlichem Fahrzeug für diese Gerätetypen niedrig, auch wenn die Kosten pro Gerät hoch sind.

Die Gesamtkosten eines Gerätetyps sind weitgehend durch die Ausbaurkosten bestimmt (siehe Kapitel 2.2). Diese wiederum ergeben sich aus der Zeit, welche für den Ausbau benötigt wird. Für eine Einschätzung der Datenqualität der Ausbaurzeit wurde ein zusätzlicher Parameter eingeführt:

Die Unsicherheiten bei der Bewertung des Umweltnutzens des Geräteausbaus werden als geringer und gleichmässiger über alle Gerätetypen verteilt eingeschätzt.

2.3.4 Beurteilung des Umweltnutzens

Die Ergebnisse des Ökobilanzmoduls zeigen den Umweltnutzen für das Szenario "Baseline" wie auch für das Szenario "EEG Ausbau". Für die Ökobilanz ist die Rückgewinnung der Basismetalle Eisen, Aluminium sowie Kupfer entscheidend. Bei der Produktion von sekundären Basismetallen

aus der Verwertung von Altmetallen wird deutlich weniger Energie benötigt. Im Falle von Aluminium ist im Schnitt zehnmal weniger Energie als bei der Primärproduktion notwendig [31]. Die Rückgewinnung von Eisen und Aluminium erfolgt bereits im Szenario "Baseline" und kann durch den "EEG Ausbau" nicht verbessert werden. Die Kupferrückgewinnung kann im Szenario "EEG Ausbau" leicht verbessert werden. Dies wird durch eine verstärkte Rückgewinnung des Kupfers aus Leiterplatten erreicht. Die zusätzliche Rückgewinnung der Edelmetalle Gold, Silber und Palladium im Szenario "EEG Ausbau" erbringt einen signifikanten Umweltnutzen. Ausserdem kann die deutlich gesteigerte Rückgewinnung von sekundärem Kunststoff einen doppelten Umweltnutzen erbringen: Es kann Primärkunststoff ersetzt werden und es wird bedeutend weniger Material verbrannt was die Emissionen reduziert. Der Ausbau der Scheinwerfer ermöglicht zudem die Entfrachtung von in bestimmten Fällen enthaltenen quecksilberhaltigen Leuchtdioden.

2.3.5 Ökonomische Beurteilung

Die Ergebnisse des Wirtschaftsmoduls zeigen die grosse Bedeutung der Ausbaurkosten. Die Transport- und Recyclingkosten sind deutlich niedriger. Allerdings ist in den Recyclingkosten der Erlös der zurückgewonnenen Materialien miteingerechnet. Die Netto-Recyclingkosten sind deshalb gering. Bei einer gleichmässigen Allokation der Gewinne aus zurückgewonnenen Materialien auf die drei Kostenstellen (Ausbau, Logistik, Recycling) würde der Anteil des Ausbaus an den Gesamtkosten etwas geringer ausfallen, während der Anteil der Recyclingkosten steigen würde. Die genaue Bestimmung der Gewinne ist jedoch schwierig, da Informationen hierzu dem Betriebsgeheimnis der Recycler unterliegen und diese abhängig von den Rohstoffpreisen sind.

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

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

Der Ausbau aller Geräte eines durchschnittlichen Altfahrzeugs im Jahr 2021 wird auf 190 CHF geschätzt. Dies entspricht ungefähr 0.5% des Verkaufspreises eines Neuwagens in der Schweiz im Jahr 2020.

2.4 Schlussfolgerungen

Der Umweltnutzen durch eine Umstellung vom Szenario "Baseline" zum Szenario "EEG Ausbau" wird durch die Rückgewinnung der Edelmetalle sowie der Kunststoffe erzielt. Daher erreichen

Gerätetypen mit einem hohen Anteil an Leiterplatten sowie Kunststoffen den grössten Umwelt-nutzenunterschied zwischen beide Szenarien. Dies trifft für Gerätetypen der Gerätekategorie "Steuergeräte" sowie für den Gerätetyp "Scheinwerfer" zu. Der Anteil an Leiterplatten ist pro kg Steuergeräte unter den vier Gerätekategorien am höchsten. Je höher die durchschnittliche Masse eines Gerätetyps pro Altfahrzeug ist, desto höher ist auch der Umweltnutzen, der mit dem Ausbau und separaten Recycling verbunden ist. Dieser Faktor begünstigt z.B. den Gerätetyp "Scheinwerfer" sowie die Steuergeräte "Infotainment", "Verstärker" oder "Wechselrichter" (die durchschnittlichen Massen der verschiedenen Gerätetypen pro Fahrzeug sind aufgelistet im Anhang D).

In der in Tabelle 6 präsentierten gemeinsamen Klassierung der Ergebnisse erzielen Scheinwerfer bei gleicher Gewichtung von ökonomischen Aspekten wie Umweltnutzen die höchste Bewertung. Steuergeräte erhalten eine bessere Klassierung als Aktuatoren, da sie edelmetallreiche Leiterplatten enthalten, welche im Szenario "EEG Ausbau" effizienter⁷ zurückgewonnen werden können. Die Gerätekategorie "Kabel" erzielt im Szenario "EEG Ausbau" keinen höheren Umweltnutzen im Vergleich zum Szenario "Baseline".

Bestimmte Scheinwerfer können Quecksilber enthalten, ein potenter Schadstoff (siehe auch Tabelle 11 in Kapitel 4). Aus diesem Grund ist der Ausbau des Gerätetyps "Scheinwerfer" zusätzlich zu bevorzugen, um eine Schadstoffentfrachtung dieser Geräte vorzunehmen. Dieser Faktor wurde in unserem Modell allerdings nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen nicht das ganze Potenzial der Rückgewinnung von in EEG enthaltenen STM. Weitere Elemente wie seltene Erden, insbesondere Neodym und Dysprosium sind in signifikanten Mengen in EEG enthalten, insbesondere beim Gerätetyp "Elektrischer Antriebsmotor mit Permanentmagneten". Diesen Gerätetyp ist im Kapitel 3 behandelt. Aktuell existieren keine wirtschaftlichen Rückgewinnungsprozesse für diese seltenen Erden. Die künftige Entwicklung solcher Prozesse könnte den Umweltnutzen durch den separaten Ausbau der EEG für ein Recycling weiter erhöhen.

Die Kosten des Ausbaus und separaten Recycling aller EEG eines Fahrzeugs von 190 CHF betragen ca., 0.5% im Vergleich mit dem durchschnittlichen Verkaufspreis eines Neuwagens in der Schweiz. Die Kosten pro Gerätetyp liegen meist unter 10 CHF/Fahrzeug. Die Ausbauproduktion ist der grösste Kostenpunkt. Weil die Gewinne aus dem Verkauf der erzeugten Sekundärrohstoffen bereits im Recyclingpreis enthalten sind, sind die Bruttokosten des Recyclings unbekannt.

In Bezug auf den Trend der Zunahme von EEG in Fahrzeugen, ist es wahrscheinlich, dass die Bedeutung der Verluste von STM aus EEG in Zukunft weiter zunehmen wird. Dies würde den Druck auf die Akteure Altfahrzeugrecyclingsystem weiter erhöhen, um deren Ausbau der Behandlung des Fahrzeugs im Grossschredder vorzuziehen.

⁷ Durch die Behandlung in einer Elektronikschrott Recyclinganlage entsteht weniger RESH und es können reineren Leiterplattenfraktionen abgetrennt werden im Vergleich zur Behandlung im Grossschredder

3 Zukunftsszenarien der STM-Massenflüsse im Fahrzeugrecycling-system

3.1 Einleitung und Ziele

Eines der Ziele vom Projekt EVA II war es, durch die Abschätzung zukünftiger EEG- und STM-Massenflüsse im Altfahrzeug-Recyclingsystem eine Entscheidungshilfe für die Systemakteure zu erstellen (vgl. Abschnitt 1.5). Veränderungen der Materialflüsse im Schweizer Altfahrzeugrecyclingsystem haben verschiedene Auswirkungen auf die Akteure. 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. In diesem Kapitel wird beschrieben, mit welchen Ansätzen dieses Ziel erreicht wurde:

- durch die Erarbeitung von Szenarien über die Entwicklung der Schweizer Fahrzeugflotte bis zum Jahr 2050;
- durch die Verwendung dieser Szenarien als Inputdaten für das dmFA Modul des Gesamtmodells (siehe Kapitel 1.6), um Simulationen der generierten Massenflüsse durchzuführen.

Dieser Ansatz wird anhand der Abschätzung zukünftiger Massenströme von Nd und Dy in Permanentmagneten von elektrischen Antriebsmotoren anhand der Simulationsergebnisse eines der entwickelten Szenarien illustriert.

Seit einigen Jahren steigt der Anteil von Hybrid- (HEV), Plug-in-Hybrid- (PHEV) und reinen Elektrofahrzeugen (BEV), alle drei Kategorien zusammen als Fahrzeuge mit Elektroantrieb (xEVs) benannt, in der Schweiz stark an. xEVs machten im Jahr 2021 43% aller in der Schweiz neuzugelassenen Fahrzeuge aus [32]. Sie unterscheiden sich von Fahrzeugen mit Verbrennungsantrieb in der Art und Anzahl ihrer EEG und der Tatsache, dass sie alle mindestens 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 8). Im Gegensatz zu den anderen in dieser Studie betrachteten Gerätetypen, deren durchschnittliche Masse etwa 1-2 kg beträgt [22], kann ein einzelner elektrischer Antriebsmotor je nach Fahrzeugtyp bis zu 50 kg wiegen [33]. 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.

Wie bereits erläutert, sind für verschiedene Schlüsseltechnologien besonders die beiden Seltenerdmetalle Neodym und Dysprosium sehr wichtig. Die Primärproduktion ist auf wenige Länder beschränkt, was Versorgungsunsicherheiten 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 [34] und könnte auch die Entwicklung in der Schweiz beeinflussen.

3.2 Methodik

3.2.1 Ansatz

Es wurden Szenarien über die zukünftige Entwicklung der Marktanteile der verschiedenen Antriebstechnologien entwickelt und mit Hilfe des dMFA-Moduls die daraus resultierenden Materialströme bestimmt. Daraus ergaben sich die Massenströme der in der Schweiz rezyklierten Altfahrzeuge und weitere Massenströme des Systems als Folge davon (siehe Abbildung 2). Auf dieser Grundlage ist es möglich, die Mengen an EEG und STM in diesen Strömen durch die Verwendung von Zusammensetzungsdaten für die entsprechenden Gerätetypen (im vorliegenden Fall über elektrische Antriebsmotoren mit Permanentmagnete) zu schätzen.

Wie in Kapitel 2 beschrieben, erlaubt das dMFA eine dynamische Betrachtung des Systems über mehrere Jahre. Das Modul benötigt Daten über die Flotte und die Anzahl Fahrzeuge pro Jahr im Recyclingstrom (sowie anderen Strömen; siehe Bericht zum dMFA Modul für eine ausführlichere Beschreibung des Moduls). Fahrzeuge, welche heute in der Schweiz neu zugelassen werden, können durch Unfälle der Flotte entzogen werden oder verlassen in 15-20 Jahren den Flottenbestand als Altfahrzeuge. Sie werden in der Schweiz rezykliert oder als Occasionfahrzeuge exportiert. Dies bedeutet, dass der Abfluss aus dem Flottenbestand mit der Anzahl der Neuzulassungen, der Lebensdauer eines Fahrzeugs sowie der Unfall- und Exportrate berechnet werden kann. Mit zusätzlichen Informationen zur Zusammensetzung der Gerätetypen sowie ihrer durchschnittlichen Masse in Fahrzeugen können in einem nächsten Schritt die Materialflüsse für Gerätetypen und STM ermittelt werden, welche in allen Altfahrzeugen in einem bestimmten Jahr enthalten sind. Dies erlaubt Rückschlüsse auf das Recyclingpotenzial dieser Metalle.

3.2.2 Szenarien

Mit aktuellen Statistiken und existierenden 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, welche über die Lebenserwartung eines Fahrzeugs hinausgehen, müssen Szenarien aus extrapolierten aktuellen Trends erstellt werden, um die zukünftige Entwicklung der Inputparameter abzuschätzen.

In Tabelle 7 sind die Inputparameter des dMFA Moduls aufgelistet sowie Informationen und Referenzen zu den Quellen angegeben, die zur Erstellung der Szenarien verwendet wurden. Ein wichtiger Parameter, der für die Szenarien entwickelt wurden, ist die Entwicklung der Schweizer Fahrzeugflotte. Um deren Entwicklung abzuschätzen, wurden drei Szenarien zur demografischen Entwicklung mit drei Szenarien zum Fahrzeugbesitz pro Person kombiniert.

Tabelle 8: 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.

Szenarien zur Entwicklung des Marktanteils jeder Antriebstechnologie für Neufahrzeuge, die in die Schweizer Flotte importiert werden, wurden in einem Workshop mit Mitgliedern der EVA II-Arbeitsgruppe (die aus wichtigen Akteuren der schweizerischen Fahrzeugbranche besteht) untersucht. Der Schwerpunkt war, die zukünftige Entwicklung der Elektrifizierung der Schweizer Fahrzeugflotte sowie die möglichen Risiken für diese Entwicklung zu diskutieren. Es wurden vier Szenarien entwickelt: "Schnelle Elektrifizierung" (siehe Abbildung 12); "Challenge A: Ungenügende Elektrizitätsproduktion" (siehe Abbildung 13); "Challenge B: Mangelnde Ladeinfrastruktur" (siehe Abbildung 14); "Challenge C: External shock" (siehe Abbildung 15).

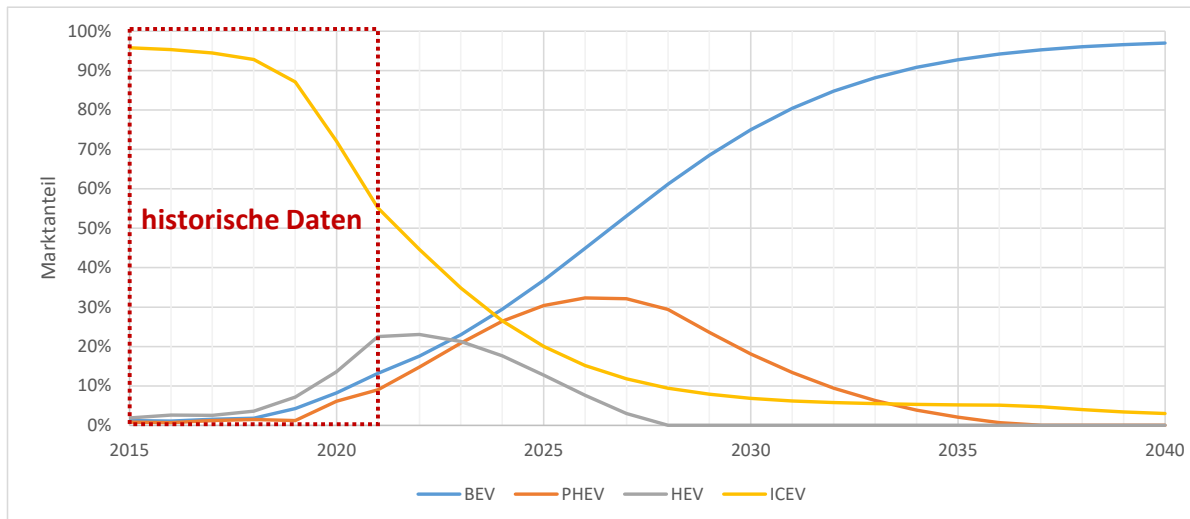


Abbildung 12: Szenario "Schnelle Elektrifizierung" der Entwicklung des Marktanteils pro Antriebstechnologien, die im Rahmen von EVA II entwickelt wurden. Das Szenario "Schnelle Elektrifizierung" wurde für die Fallstudie in diesem Bericht verwendet. BEV steht für Battery Electric Vehicle (reine Elektrofahrzeuge), PHEV und HEV für (Plug-in) Hybrid Electric Vehicle, und ICEV für Internal Combustion Engine Vehicle (Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren)

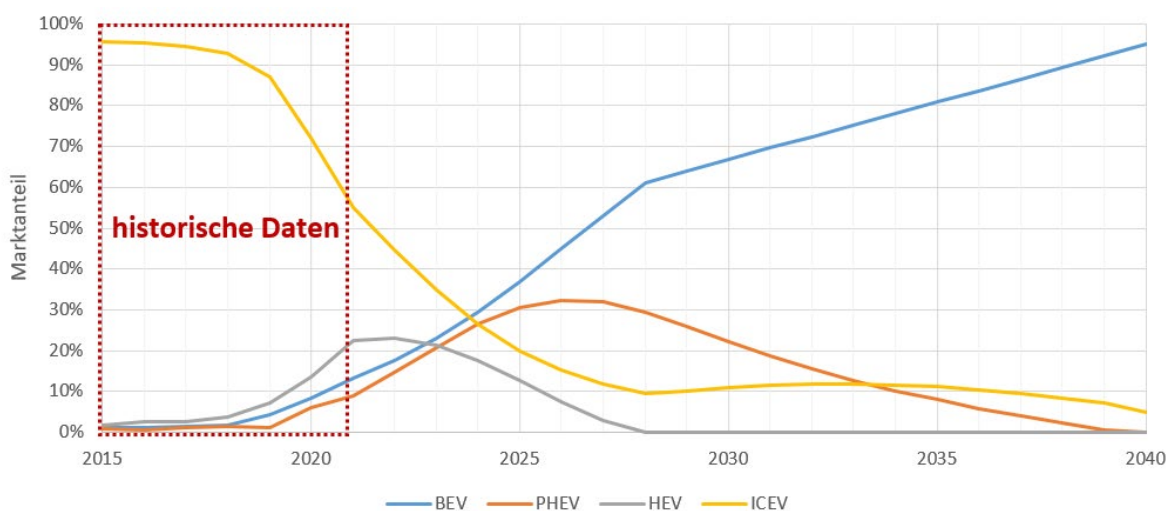


Abbildung 13: Szenario "Challenge A: Ungenügende Elektrizitätsproduktion" der Entwicklung des Marktanteils pro Antriebstechnologie, die im Rahmen von EVA II entwickelt wurden. BEV steht für Battery Electric Vehicle (reine Elektrofahrzeuge), PHEV und HEV für (Plug-in) Hybrid Electric Vehicle, und ICEV für Internal Combustion Engine Vehicle (Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren)

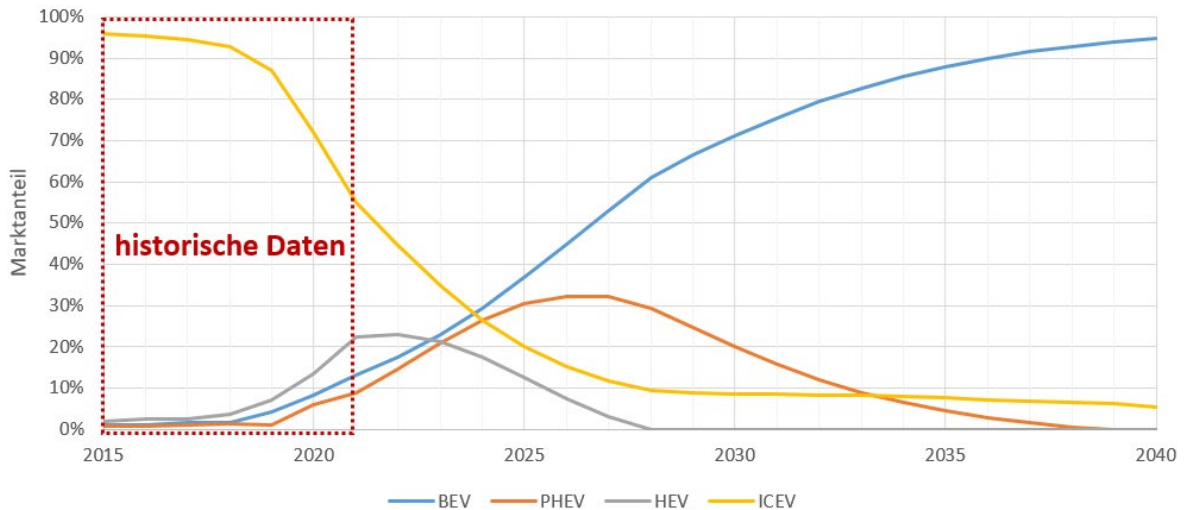


Abbildung 14: Szenario "Challenge B: Mangelnde Ladeinfrastruktur" der Entwicklung des Marktanteils pro Antriebstechnologie, die im Rahmen von EVA II entwickelt wurden. BEV steht für Battery Electric Vehicle (reine Elektrofahrzeuge), PHEV und HEV für (Plug-in) Hybrid Electric Vehicle, und ICEV für Internal Combustion Engine Vehicle (Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren)

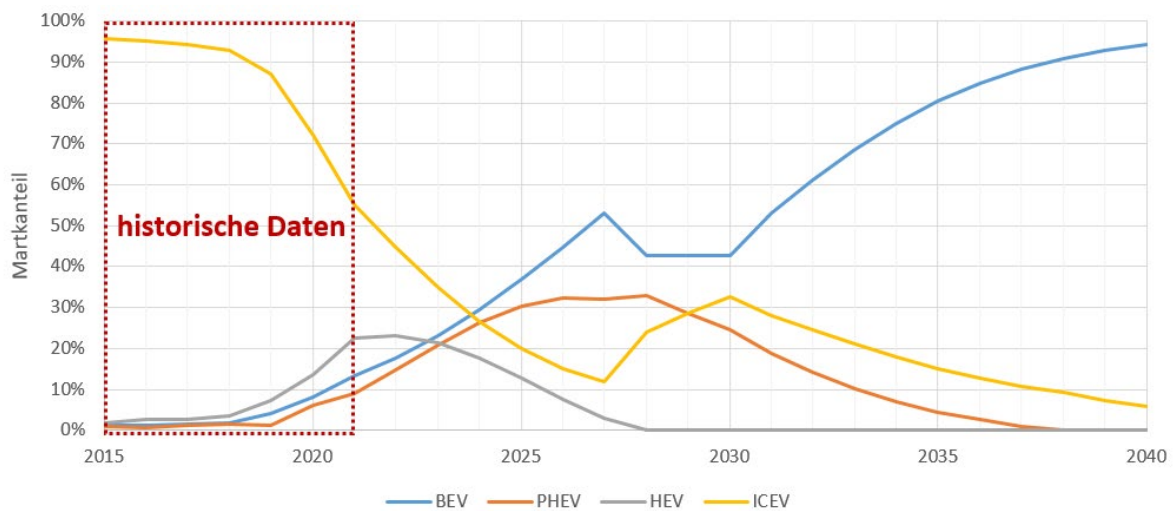


Abbildung 15: Szenario "Challenge C: External shock" der Entwicklung des Marktanteils pro Antriebstechnologie, die im Rahmen von EVA II entwickelt wurden. BEV steht für Battery Electric Vehicle (reine Elektrofahrzeuge), PHEV und HEV für (Plug-in) Hybrid Electric Vehicle, und ICEV für Internal Combustion Engine Vehicle (Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren)

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)⁸. 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

⁸ EU Entscheid zum Verbrenner-Aus im Jahr 2035 wurde erst nach der Festlegung der Szenarien im Workshop bekannt gegeben

nächsten Jahre keine ICEV Fahrzeuge mehr produzieren werden. Dieser Trend wurde durch immer striktere Anforderungen betreffend des CO₂-Ausstosses von Neufahrzeuge sowie daraus ausgelöste strategische Neuorientierungen der Automobilhersteller ausgelöst.

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

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.

3.2.3 Daten zu elektrischen Antriebsmotoren mit Permanentmagneten

Kombiniert man die Anzahl der in der Schweiz recycelten Fahrzeuge mit der durchschnittlichen Masse der elektrischen Antriebsmotoren mit Permanentmagneten pro Fahrzeug und ihrem Gehalt an Neodym, Dysprosium sowie Kupfer, können die Massenströme dieser Elemente geschätzt werden. Diese Daten sind in Tabelle 8 dargestellt.

Reine Elektrofahrzeuge (BEV) besitzen im Durchschnitt die grösste Masse an elektrischen Antriebsmotoren, welche auch die grössten Anteile an STM zeigen. Es gibt aber viele verschiedene Fälle und Schwankungen je nach Modell. Zum Beispiel besitzen gewisse BEVs Induktionsmotoren, welche keine Permanentmagnete aufweisen und bestimmte BEVs haben zwei elektrische Antriebsmotoren statt nur einen. Für die Berechnung der durchschnittlichen Werten wurden Daten aus einer JRC-Studie, 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 9: 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 Antriebsmotor 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

3.3 Ergebnisse und Diskussion

In dieser Fallstudie verwendete die Simulation 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", als Beispiel. Ähnliche Simulationen können aber mit allen möglichen Kombinationen der im letzten Absatz beschriebenen Parameter und Szenarien durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

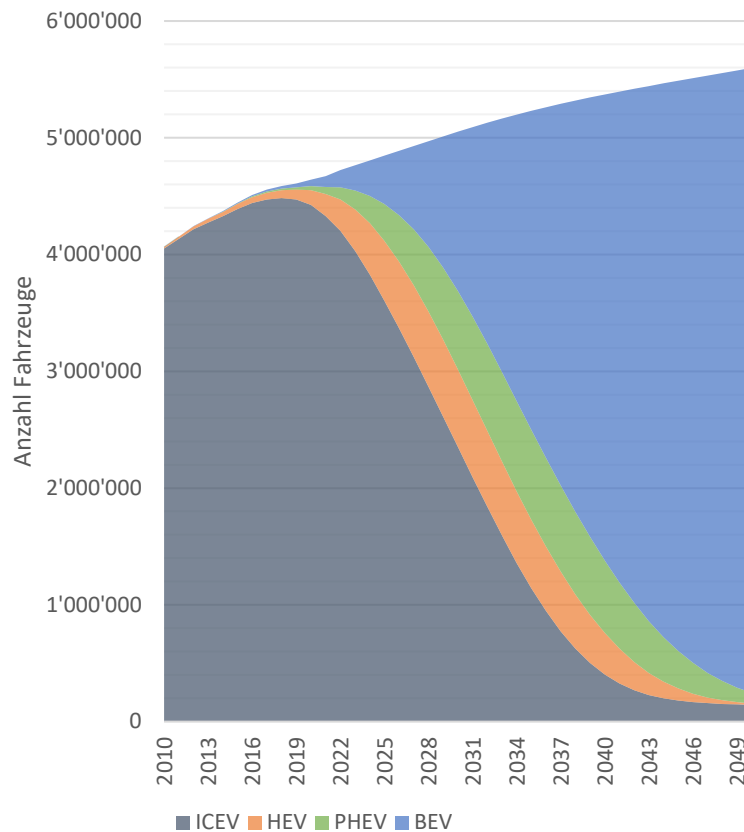


Abbildung 16: Fahrzeugflotte nach Antriebstechnologie von 2010 bis 2050, basierend auf historischen Daten bis 2021 und auf dem Szenario "Schnelle Elektrifizierung" ab 2022. BEV steht für Battery Electric Vehicle (reine Elektrofahrzeuge), PHEV und HEV für (Plug-in).

Abbildung 13 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.

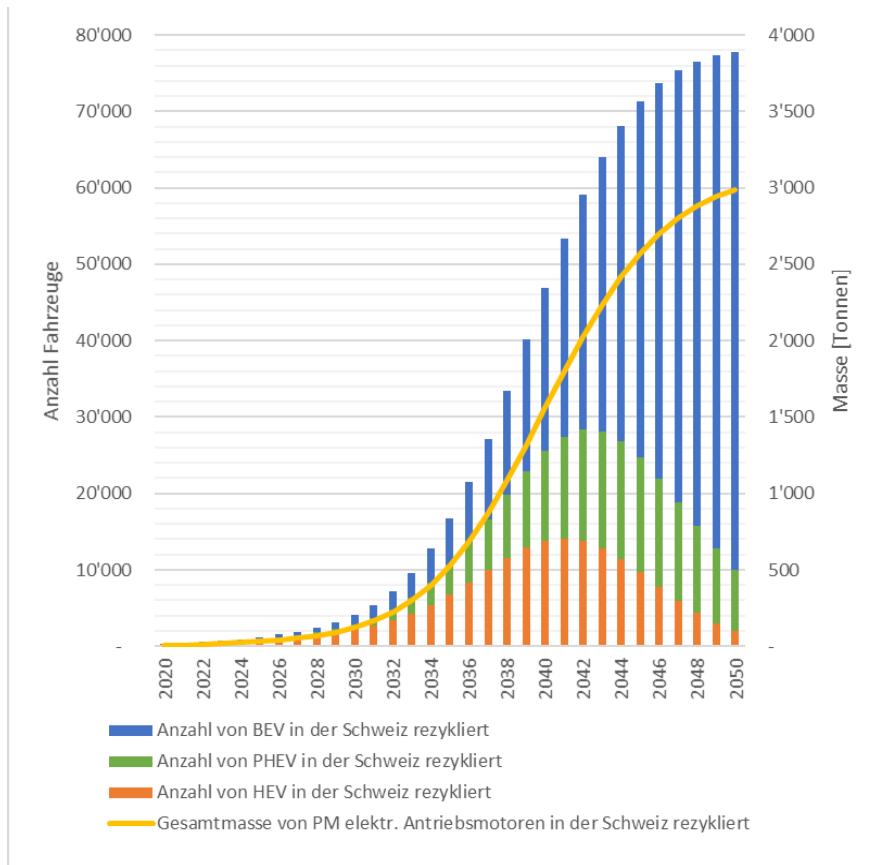


Abbildung 17: Anzahl der in der Schweiz recycelten xEVs und Masse an Elektroantriebsmotoren sowie enthaltenen STM in diesem Massenstrom von 2020 bis 2050.

In Abbildung 14 ist die Anzahl der in der Schweiz recycelten xEVs in der Simulation dargestellt. 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.

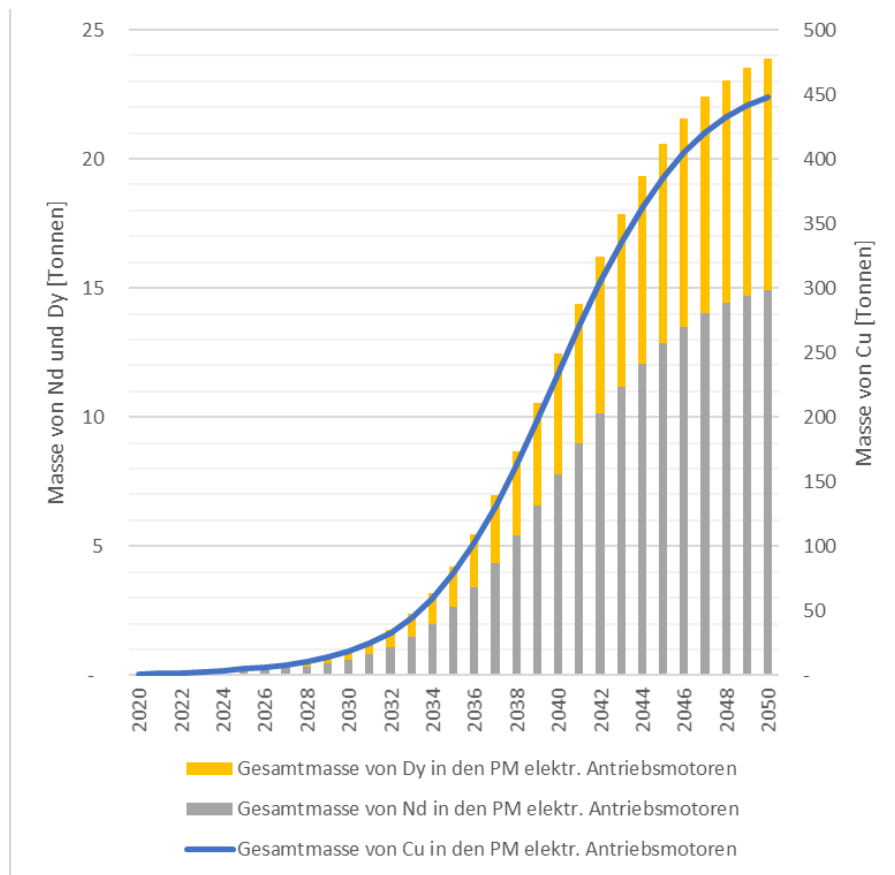


Abbildung 18: Masse an Nd, Dy und Cu enthalten in elektrische Antriebsmotoren mit Permanentmagnete von Fahrzeugen die in der Schweiz rezykliert werden von 2020 bis 2050.

Abbildung 15 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 rezykliert 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.

3.4 Diskussion und 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 Elektrifizie-

runge"), ergibt sich mit einer gewissen Verzögerung auch eine stark ansteigende Menge an Altfahrzeugen mit elektrischen Antriebsmotoren mit Permanentmagneten⁹. 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.

⁹ Aber nicht nur. Es gibt auch mehr elektrische Antriebsmotoren mit Induktion

4 Verluste von STM und anderen Metalle im RESH aus Altfahrzeugen

4.1 Einleitung und Ziele

Die STM in Fahrzeugen sind in deren EEG stark konzentriert. Wenn Altfahrzeuge im Grossschredder behandelt werden, konzentrieren sich diese STM in einer Fraktion dieses Prozesses auf, dem sogenannten Reststoffe Schredder (RESH) Output. Dieser entspricht der leichten Fraktion, welche aus dem Schredder abgesaugt wird. Er setzt sich aus kleinen Kabelstücken, Staub und weiteren kleinen Teilchen (z.B. Leiterplatten-Teilchen), die durch intensive Stösse und Reibungen während des Schredderns entstehen, zusammen. Der Grossteil der STM befindet sich angeheftet an den kleineren Partikeln. Der RESH ist ein Produktionsabfall des Fahrzeugrecyclingprozesses. Etwa 15-20% der Masse eines geschredderten Fahrzeugs endet in der RESH-Fraktion. Dieser wird anschliessend mit den enthaltenen STM in Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) verbrannt und die darin enthaltenen Metalle werden nur beschränkt zurückgewonnen.

Einige KVA in der Schweiz sind mit Schlackenaufbereitungssystemen ausgerüstet, durch welche bedeutende Mengen verschiedener Metalle aus der Schlacke, einschliesslich einiger Edelmetalle, zurückgewonnen werden können. Die Effizienz dieses Prozesses wurde in einer Studie der ZAR abgeschätzt [53]. Diese berücksichtigte allerdings nur eine eingeschränkte Anzahl Metalle (die meisten STM wurden nicht untersucht) und fokussierte sich ausschliesslich auf die Inputs aus der Verbrennung von Kehricht. Im Gegensatz zu Kehricht, wo STM in Form von makroskopischen Objekten vorliegen (es findet keine gezielte Zerkleinerung oder Reibung vor der Verbrennung statt), sind STM in RESH in mikroskopischen Partikeln konzentriert. Da Schlackenaufbereitungsanlagen sehr kleine Partikel nicht behandeln können (im Fall der KEZO gehen Schlackenpartikeln, die kleiner als 300 Mikrometer sind, verloren), verringert dies das Rückgewinnungspotenzial der STM. Ein signifikanter Anteil der STM, die im RESH enden, gehen deshalb verloren [53]–[56].

Um die Leistung des Schweizer Altfahrzeug-Recyclingsystems in Bezug auf Verluste von STM und anderen Wertstoffen in EEG zu bestimmen (siehe Kapitel 1.5), muss man in der Lage sein, die Mengen an STM im RESH bestimmen zu können. Eine wiederholte Bestimmung der STM-Mengen im RESH würde es auch ermöglichen, die Auswirkungen der Umsetzung einer "Ausbau-geräteliste" im Rahmen der revidierten VREG zu verfolgen. Würden solche Geräte in Alt-Fahrzeuge vor dem Schreddern entfernt, würden die darin enthaltenen STM nicht mehr mit dem RESH verloren gehen.

Die Bestimmung der STM-Mengen im RESH erfordert eine Messmethodik, welche auf einem repräsentativen Probenahme- und Analyseprotokoll aufbaut. Damit sollen genaue und präzise Ergebnisse erreicht werden. Die Methodik soll zudem so einfach und kostengünstig wie möglich sein. In diesem Kapitel werden die Messmethodik, die zu diesem Zweck im Rahmen von EVA II entwickelt wurde, sowie die Ergebnisse des Experiments, in welchem ihre Präzision und Genauigkeit überprüft wurden, vorgestellt.

4.2 Methodik

4.2.1 Ansatz

RESH ist eine sehr heterogene Fraktion mit einer weiten Korngrößenverteilung (von wenigen Mikrometern bis zu etwa 10 cm). Er unterliegt einem starken "Nugget-Effekt" hinsichtlich vieler STM. Dies bedeutet, dass sich die STM nicht homogen im RESH verteilen, sondern vorwiegend in wenigen kleinen Teilchen konzentriert sind (z.B. in einem Stück eines Leiterplattensteckers, in einem kleinen elektronischen Kabel oder im Staub). Beinahe komplett abwesend sind STM im Rest der enthaltenen Teilchen (Flaum, Stoff, Kunststoff, etc.). Es ist sehr anspruchsvoll, aus RESH eine repräsentative Probe zu entnehmen, da diese möglichst homogen sein muss und gleichzeitig den gesamten RESH möglichst gut repräsentieren muss [12]. Entnimmt man beispielsweise vom oberen Teil einer RESH-Menge eine Probe von einem halben Kilogramm, kann diese zu viele Stücke von ca. 10 cm ohne STM Anhaftungen enthalten, da diese dazu tendieren, sich an der Oberfläche von RESH-Haufen anzusammeln. Wenn man die Probe aus dem unteren Teil entnimmt, überwiegt der Staubanteil mit entsprechend hohen STM-Massengehalten. Keine dieser beiden Proben ist repräsentativ für die Gesamtmenge des RESH. Ausserdem kann die chemische Analyse nur an sehr kleinen Proben durchgeführt werden, die sich im Grammbereich bewegen. Daher muss die analysierte Probe mehrmals sorgfältig zerkleinert, gemischt und geteilt werden, um repräsentative STM Gehalte für die gesamte RESH Menge zu erhalten.



Abbildung 19: Beispielbild RESH des Experiments, aufgenommen nach der Probennahme bei der KEZO.

4.2.2 Messmethodik

Die Messmethodik der Massenanteile von STM im RESH besteht aus zwei Teilen: dem Probenahmeprotokoll und dem Analyseprotokoll. Die einzelnen Schritte der Messmethodik sind in der Tabelle 10 beschrieben.

Tabelle 10: Beschreibung der Messmethodik von STM-Massenanteilen in RESH

Teil	Vorgehen
Probenahme	Probenahme bei der Entladung von RESH im Brennstoffbunker der KVA, während dem der RESH in einem regelmässigen Materialfluss auf das Förderband aus dem Vorschredder fällt
	Periodische Probenahme von RESH während der gesamten Entladung mit einem 10-Liter-Eimer, bis eine Mischprobe von mindestens 60 kg erhalten wird [57]
	Sorgfältiges Mischen der Probe
	Zerkleinerung der Probe bis zu einer maximalen Korngrösse von 2cm mit einer Hammermühle
	Quartering ¹⁰ und Mischen der Probe, bis eine Teilprobe von etwa 4 kg erhalten wird
	Aufbereitung der Teilprobe durch kryonische Zermahlung und Quartering bis die maximale Teilchengrösse weniger als 1 mm ist und die Probemasse 20g entspricht.
Analyse	Aufteilung der Probe in drei Replikate, um jede Untersuchung drei Mal durchzuführen
	Untersuchung der Elemente Al, Au, Cd, Cr, Cu, Dy, Fe, Hg, La, Nd, Ni, Pb, Pd, Pt, Sb, Sn und Zn
	Semi-quantitative Analyse durch WD-XRF-Analyse zur Erkennung der Anwesenheit der Elemente
	Quantitative Analyse durch ICP-OES und ICP-MS: zur Erkennung der Massenfraktion jedes Elements, Teilprobe wird dreimal untersucht.

4.2.3 Bewertung der Präzision und Genauigkeit der Messmethodik

Die Messmethodik wurde im Rahmen eines Experiments angewandt, um ihre Präzision und Genauigkeit zu testen. Das Experiment besteht aus der Durchführung eines Schredderversuchs von zwei getrennten "Batches" von 100 Fahrzeugen. Die Fahrzeuge des einen "Batches" enthalten noch ihren Motor, während bei allen Fahrzeugen des anderen "Batches" der Motor systematisch entfernt wurde. Da einige der EEG direkt an den Motoren befestigt sind, werden bei einer Entfernung des Motors diese Geräte ebenfalls aus dem Fahrzeug entfernt. Um die Sensitivität des Experiments überprüfen zu können wurde untersucht, ob die Ergebnisse des Experiments einen Unterschied zwischen beiden Batches zeigen können. Während der Probenaufbereitung wurden in mehreren Schritten Duplikate hergestellt, um Teilproben zu erzeugen, die - wenn die Probenaufbereitung perfekt ist - identische Merkmale aufweisen sollten. Zudem wurde ein Wiederfindungsexperiment durch "Spiking"¹¹ mit Yttrium und Ytterbium an unterschiedlichen Stellen des Experiments durchgeführt, um die STM-Verluste während des Probenaufbereitungsprozesses zu quantifizieren. Die Analyse und der Vergleich der Ergebnisse aller Teilproben ermöglichen es, die Präzision und Genauigkeit der Messmethode zu testen.

Eine Messung ist genau, wenn es keine systematische Abweichung gibt d.h., wenn der Durchschnitt vieler Einzelmessungen gegen Null geht. Hingegen ist eine Messung präzise, wenn die Streuung vieler Einzelmessungen nahe Null liegt. Abbildung 21 illustriert den Unterschied zwischen Messgenauigkeit und Messpräzision.

¹⁰ "Quartering" ist eine Prozedur, das darin besteht, eine Probe zu mischen, sie auf einer Fläche auszubreiten und das Material nur auf einem Viertel der Fläche zu sammeln, um das Experiment fortzusetzen; der Rest wird entsorgt. Ziel ist es, aus einer Anfangsprobe repräsentative Teilproben zu erzeugen.

¹¹ "Impfen" der Probe mit bestimmten Fremdstoffen, welche natürlicherweise nicht in der Probe enthalten sind, um sicherzustellen, dass kein Material verloren geht sowie die homogene Mischung der Probennahme gewährleistet ist. Ziel ist dieselben Gehalte der Fremdstoffe in der Laboranalyse wiederzufinden.

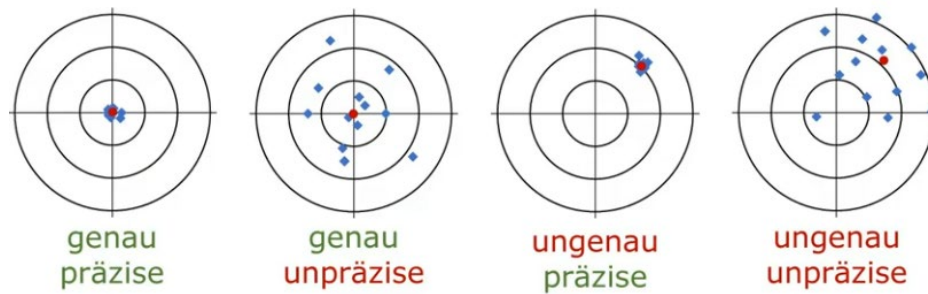


Abbildung 20: Illustration des Unterschieds zwischen Messgenauigkeit gegenüber Messpräzision.

Abbildung 22 zeigt den Versuchsablauf des Experiments. Der Weg der STM der beiden Batches M (mit Motoren) und O (ohne Motoren) verläuft wie beschrieben vom Grossschredder in den RESH, zur Probennahme sowie zur weiteren Zerkleinerung und schliesslich zu Spiking, Quartering sowie der finalen Probennahme für die Laboranalyse.

Das Experiment besteht aus den folgenden Schritten

1. Vorbereitung der Batches

Für das Schredderexperiment wurden zwei Batchversuche mit je 100 Alt-Fhz gefahren, der erste Batch mit Motoren (Batch M, ~108 Tonne) und der zweite ohne Motoren (Batch O, ~80 Tonnen).

2. Schreddern und Transport

Beide Batches wurden in einem Grossschredder zerkleinert. Anschliessend wurde der erzeugte RESH beider Batches gesammelt. Die Endmasse des RESH betrug 17'400 kg für Batch M (16.1 % RESH-Anteil) und 13'900 kg für Batch O (17.3 % RESH-Anteil). Nach jedem Schredderprozess wurde der RESH im Lastwagen zur Kehrichtverbrennungsanlage KEZO in Hinwil transportiert und durch einen Vorschredder auf ein Förderband entladen, welches den RESH in den Brennstoffbunker transportierte.

3. Probenahme und -aufbereitung

Die Probenahme fand statt, währenddem der RESH in einem mehr oder weniger regelmässigen Materialfluss aus dem Vorschredder auf das Förderband fiel. Um zwei repräsentative Proben von jedem Batch zu erhalten, erfolgte die Probenahme während des gesamten Entladeprozesses: M-1, M-2, O-1 und O-2. Die Proben wurden sorgfältig gemischt und mit einer Hammermühle bis zu einer maximalen Korngrösse von 2 cm zerkleinert. Durch Quartering und Mischen wurden 8 Teilproben (2 pro Probe) von etwa 4 kg erhalten. Das "Spiking" mit Yttrium und Ytterbium fand während diesem Schritt statt. Die Teilproben wurden von der Firma Bachema AG durch kryonische Zermahlung und Quartering auf die maximale Teilchengrösse von weniger als 1 mm zerkleinert und auf die Probemasse von ca. 20 g reduziert.

4. Chemische Analyse

Die Teilproben wurden anhand des Analyseprotokolls bezüglich der Massengehalte der Elemente Al, Au, Cd, Cr, Cu, Dy, Fe, Hg, La, Nd, Ni, Pb, Pd, Pt, Sb, Sn, Y, Yb und Zn untersucht (siehe Tabelle 9).

5. Statistische Analyse der Ergebnisse

Zur Überprüfung der Robustheit der Methodik wurde eine statistische Analyse der Ergebnisse durchgeführt.

Präzision wird definiert als das Ausmass, in welchem die Ergebnisse übereinstimmen. Dies wird ausgedrückt durch die Standardabweichung oder den Varianzkoeffizienten. Die Standardabweichung misst den Grad der Variabilität der einzelnen Daten vom Mittelwert. Der Varianzkoeffizient misst das Verhältnis der Standardabweichung zum Mittelwert.

Genauigkeit bezieht sich darauf, wie nahe die Ergebnisse an den tatsächliche Werten liegen. Um dies festzustellen, wurde eine statistische Analyse bezüglich der Repräsentativität durchgeführt, welche die Proben und Teilproben eines Batches jeweils miteinander vergleicht. Wenn die Analyse mehrerer Teilproben, die durch denselben Prozess entnommen wurden, ähnliche Ergebnisse erzeugt, weist dies daraufhin, dass die Ergebnisse die "tatsächlichen" Werte des ursprünglichen Materials gut repräsentieren. Proben und Teilproben wurden mittels einer gepaarten, zweiseitigen T-Test-Verteilung auf statistische Unterschiede geprüft. Durch diese wird ermittelt, ob die Mittelwerte der beiden Datenreihen bei einem Vertrauensintervall von 95% signifikante Unterschiede aufweisen.

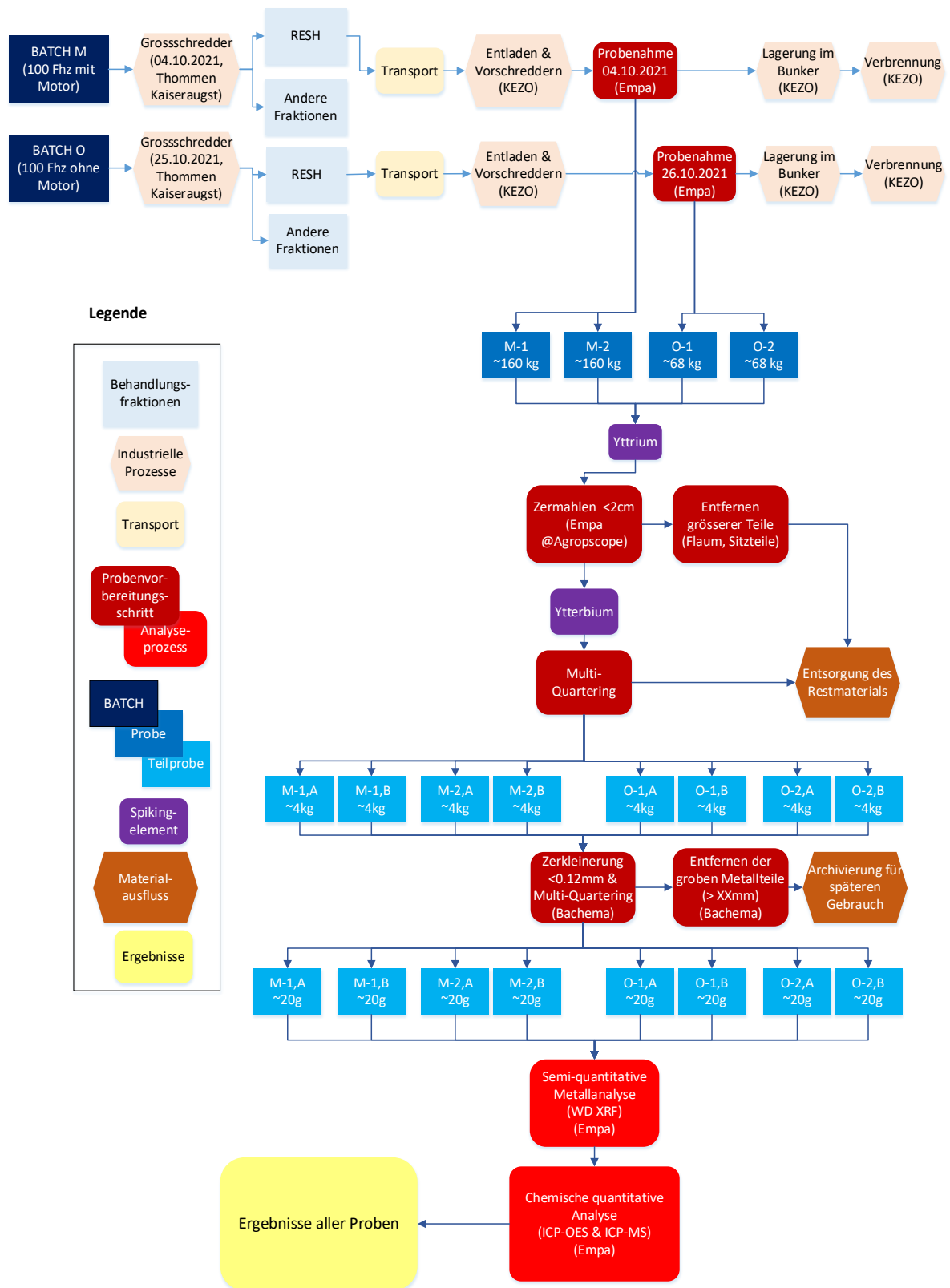


Abbildung 21: Ablauf des Experiments, um die Präzision und Genauigkeit der Messmethodik zu beurteilen.

4.3 Ergebnisse

Abbildung 24 zeigt die Massenanteile der verschiedenen im RESH enthaltenen STM. Die Werte in Blau entsprechen den Proben aus dem RESH bei denen Motoren in den Altfahrzeugen enthalten waren (Batch M), während die Werte in Orange den Proben aus RESH aus Fahrzeugen mit vorheriger Entfernung der Motoren entsprechen (Batch O). Allen Werten ist die Standardabweichung der Messungen als Fehlerintervall beigefügt.

Abbildung 23 zeigt zudem die Ergebnisse der statistischen Analyse. Der "t-test" zeigt, wie zwei Gruppen von Messwerten sich gegenseitig unterscheiden, indem er die Wahrscheinlichkeit p berechnet, dass diese beiden Gruppen von Messwerten nicht zur gleichen Normalverteilung gehören. Dies würde bedeuten, dass der "wahre" Wert, den sie messen, unterschiedlich ist. Der Varianzkoeffizient vergleicht die Varianz aller Messgrößen einem Batch mit dem Mittelwert dieser Messgrößen.

Subsets	t-test			Varianzkoeffizient	
	Proben M1&M2	Proben O1&O2	Batches M&O	Batch M	Batch O
Fe				1.6%	1.4%
Al				2.0%	1.6%
Cu				2.6%	4.8%
Zn				1.5%	1.6%
Cr				2.8%	1.9%
Ni				2.8%	3.8%
Pb				1.3%	0.5%
Sb				1.9%	1.7%
Sn				3.5%	3.5%
Yb				1.3%	1.0%
Y				1.2%	0.9%
Nd				1.8%	3.5%
La				2.2%	3.5%
Cd				3.9%	19.9%
Dy				4.2%	4.5%
Pd		*	*	4.9%	0.8%
Au		*	*	15.8%	5.3%
Hg				6.4%	23.2%
Pt				8.5%	50.8%

* einige Messungen liegen unter der Nachweisgrenze

Legende	
Kein signifikanter Unterschied zwischen den Messwertgruppen	
Signifikanter Unterschied zwischen den Messwertgruppen mit einer Wahrscheinlichkeit von >95%	0.01 < p < 0.05
	0.001 < p < 0.01
	0.0001 < p < 0.001

Abbildung 22: Ergebnisse der statistischen Analyse. Die grüne Skala zeigt die STM für jedes Paar von Messreihen an, zwischen denen ein signifikanter statistischer Unterschied festgestellt wurde (je dunkler das Grün, desto signifikanter der Unterschied). Die Farben Blau und Rot zeigen für jeden Batch die STM an, für die der Varianzkoeffizient am niedrigsten bzw. am höchsten ist.

Vergleich der STM Massengehalte in den Batches M und O

Der Vergleich der STM-Massenanteile beider Batches durch den "t-test" hat ergeben, dass zwölf Elemente (Cu, Cr, Ni, Pb, Sb, Sn, Yb, Y, Cd, Hg, Pt) keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Andererseits weisen sieben Elemente (Al, Fe, Zn, Dy, La, Nd, Pd und Au) statistisch signifikante Unterschiede in den beiden Batches auf (siehe Abbildung 19).

Die Tatsache, dass ein signifikanter Unterschied zwischen den Batches für Elemente besteht, die sehr geringe Massenanteile aufweisen (Dy, La, Pd, Au und Nd), bestätigt, dass die Messmethodik geeignet ist, Variationen zwischen den zwei Batches aufzuzeigen. In diesem Fall deuten die niedrigen Massenanteil für Nd und Dy darauf hin, dass einige Aktuatoren zusammen mit den Motoren entfernt wurden, da sich diese beiden Elemente meist in den Permanentmagneten der Elektromotoren befinden. Der Unterschied in den Massenanteilen von Au hängt wahrscheinlich mit dem Entfernen einiger Steuergeräte zusammen, in welchen Au am häufigsten vorkommt. Die Massenanteile von Pd in Batch M ist bedeutend und höher als erwartet, wenn man die Nutzung von Pd in der Elektronik erwartet. Dies könnte daran liegen, dass in Batch M noch einige Katalysatoren (welche Pd enthalten) vorhanden waren, obwohl diese bei der Trockenlegung hätten entfernt werden müssen.

Von beiden Analyten Yttrium und Ytterbium wurde ein Massenanteil von ca. 65 ppm in Batch M und ca. 80 ppm in Batch O erwartet. Die Wiederfindungsraten betragen durchschnittlich 73% für Y und 92% für Yb. Die hohen Wiederfindungsraten für beide Analyten weisen darauf hin, dass der Probenaufbereitungsprozess verlustarm ist. Die ein wenig tiefere Wiederfindungsrate für Y lässt sich dahingehend interpretieren, dass in der ersten Stufe des RESH-Zerkleinerung (siehe Abbildung 18) ein Teil des Y verloren geht. Die darauffolgenden Zermahlungsprozesse geschahen unter Laborabläufen, die darauf ausgelegt sind, die Verlustraten möglichst gering zu halten. Folglich ist der Zerkleinerungsprozess, welcher in der Hammermühle stattfindet, der einzige Schritt im Probenaufbereitungsprotokoll, in welchem bedeutende Mengen STM verloren gehen könnten, da die darauffolgenden Schritte in strikten Laborprozeduren ablaufen. Die Tatsache, dass für alle Teilproben die Analyten ähnliche Massenanteile haben, deutet darauf hin, dass die Teilproben für die Proben und Batches, von welchen sie entnommen wurden, repräsentativ sind.

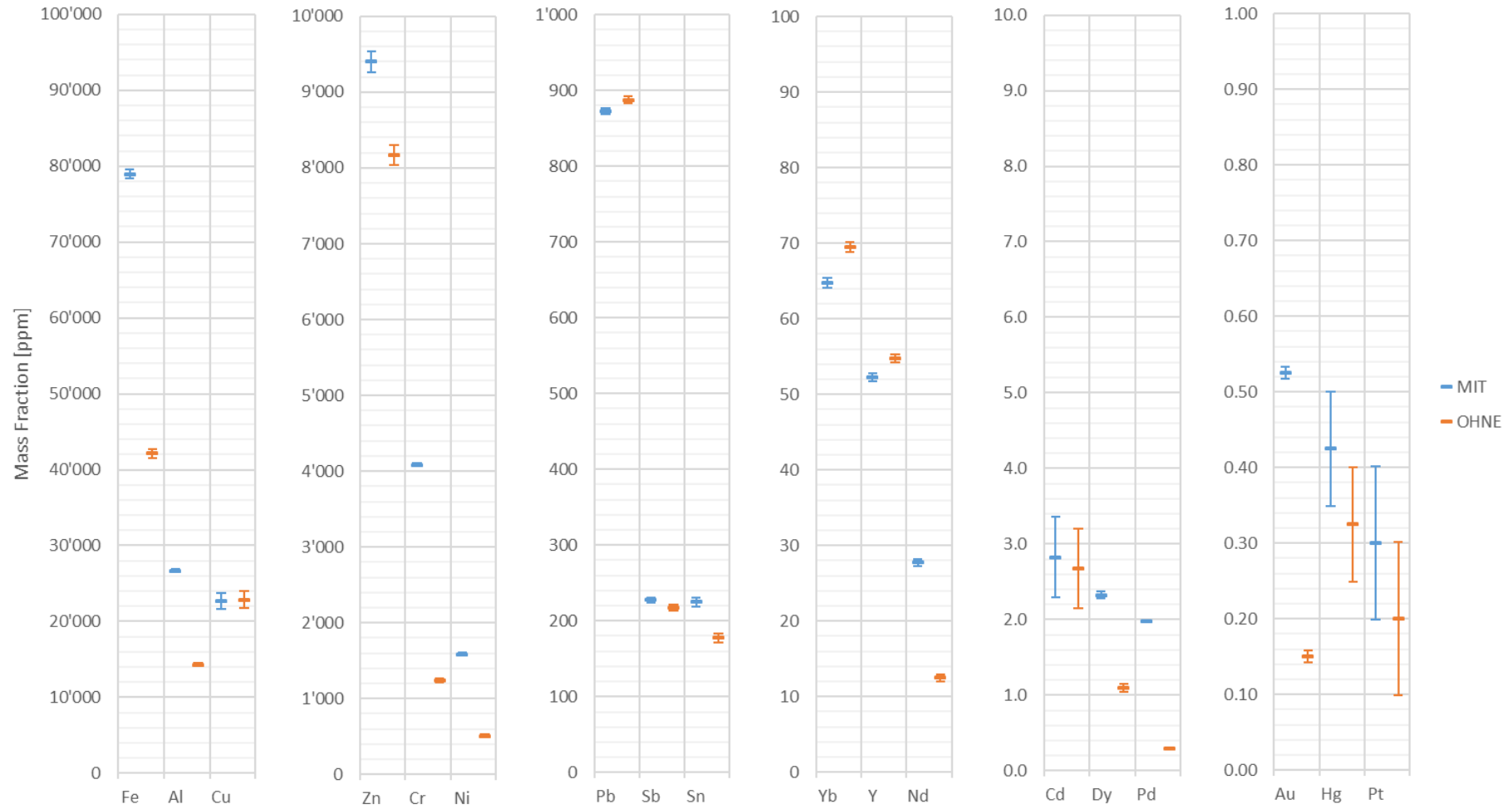


Abbildung 23: Massenanteile der analysierten Elemente mit entsprechenden Grössenordnungen (ppm). "MIT" repräsentiert den Batch mit Motoren, und "OHNE" den Batch ohne Motoren.

Präzision und Genauigkeit der Ergebnisse

Abbildung 23 zeigt die statistische Auswertung der Ergebnisse aus Abbildung 24. Es wurden statistische Veränderungen zwischen den Batches wie auch zwischen den Proben untersucht. Für einige der Elemente kann eine statistisch signifikante Veränderung zwischen den Batches festgestellt werden. Zwischen den Proben kann nur in drei Fällen eine statistische Veränderung festgestellt werden.

Die Genauigkeit der Ergebnisse wird durch die Varianzkoeffizienten geschätzt (siehe Abbildung 23). Über die gesamte Liste der analysierten Elemente variiert die Genauigkeit jeweils: Der Medianwert für die Teilproben beträgt 4%, jener für die Proben 3% und jener für die Batches ebenfalls 3%. Angesichts des Aufbaus des Experiments und der Eigenschaften der Materialien deuten diese Ergebnisse auf eine hohe Präzision der Probennahme und des Analysenprotokolls hin.

Die Ergebnisse für alle Elemente wurden mittels eines T-Tests auf statistisch signifikante Unterschiede zwischen Proben (die durch Teilprobensets repräsentiert werden, z.B. Probe M-1 wird durch die Teilproben M-1,A und M-1,B repräsentiert) und Batches (die durch Probensets repräsentiert werden) geprüft.

Der Vergleich zwischen den Proben derselbe Batch hat gezeigt, dass statistische Unterschiede nur in drei Fällen zu finden waren; für Sn im Batch M und für Pb und Y im Batch O. Dies bedeutet, dass die Proben einem Batch die meisten Elemente genau darstellen, da die Proben derselbe Batch das Ziel haben, die einzigartigen Merkmale diesen Batches zu erfassen.

4.4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Das ausführliche, komplexe und zeitintensive Experiment, welches in diesem Kapitel beschrieben wurde, hatte zwei Ziele:

- Entwicklung und Durchführung einer Messmethodik, die aus einem Probenahme- und einem Analyseprotokoll für den RESH besteht, um dessen STM-Inhalt zu messen.
- Nachweis, dass das Protokoll im Stande ist, **präzise** und **genaue** Ergebnisse zu erzeugen, die es ermöglichen, **Unterschiede in der Komposition der Alt-Fhz festzustellen**. Wie die Ergebnisse gezeigt haben, wurden alle drei Bedingungen (Präzision, Genauigkeit und Feststellung möglicher Unterschiede in der Komposition) für die meisten Elemente erfüllt, auch wenn einige nur in sehr geringen Massenanteilen vorhanden sind.

Folglich kann das Messprotokoll effektiv als Monitoringinstrument für die Bestimmung der Verluste von STM und anderen Wertstoffen im Schweizer Fahrzeugrecyclingsystem benutzt werden. Für den Gebrauch der Messmethodik im Rahmen des Monitoringinstruments sollten folgende Anpassungen vorgenommen werden:

- Nur ein Batch mit 100 Alt-Fhz mit Motoren
- Keine Teilproben, aber Beibehaltung zweier Proben pro Batch, um eine Qualitätskontrolle beizubehalten

- Kein Spiking mit Y und Yb
- Messen einer Auswahl an STM, die von Interesse sind
- Probenvorbereitung, die an Ort und Stelle erfolgt mit geeigneter Ausrüstung (Hammermühle)
- Durchführung der chemischen Analyse in einem kommerziellen Labor

Unter Berücksichtigung dieser Anpassungen kann das Experiment regelmässig und effizient durchgeführt werden. Idealerweise würde dieses mit mehreren Batches aus unterschiedlichen Grossschreddern und verschiedenen Kehrrichtverbrennungsanlagen durchgeführt, um ein repräsentativeres Bild der Situation in der gesamten Schweiz zu erhalten.

Tabelle 11: Schätzung des Rückgewinnungspotenzials ausgewählter STM in Massen sowie finanziellem Wert (LME)

	Alt-Fhz in der CH rezykliert (~60k)		Alle Alt-Fhz aus der CH Flotte	
	Jährliche Masse* [kg/Jahr]	Jährlicher Wert** [CHF/Jahr]	Jährliche Masse* [kg/Jahr]	Jährlicher Wert** [CHF/Jahr]
Gesamt	10'440'000		52'200'000	
Cu	236'988	2'500'000	1'184'940	12'500'000
Pb	9'109		45'545	
Nd	290	75'000	1'449	370'000
Dy	24.3	16'000	121	80'000
Pd	20.6	1'500'000	103	7'500'000
Au	5.48	340'000	27.4	1'700'000
Hg	4.44		22.2	
Pt	3.13	100'000	15.7	500'000

*Geschätzt basierend auf den Werten des Batches M (mit Motoren)
**Geschätzt basierend auf Marktpreisen im April 2022

Jedes Jahr erreichen in der Schweiz etwa 300'000 Fahrzeuge ihr Lebensende und verlassen die Fahrzeugflotte, wovon etwa 60'000 innerhalb der Schweiz behandelt werden. Dies bedeutet, dass pro Jahr in der Schweiz mehr als 10'000 Tonnen RESH entstehen, welcher bedeutende Mengen an STM enthält. Tabelle 11 zeigt die Mengen einer Auswahl an Metallen, die in den Massenflüssen des RESH enthalten sind und somit das Rückgewinnungspotenzial bestimmter STM. Die Mengen wurden auf Basis der Ergebnisse, die in diesem Kapitel präsentiert wurden, berechnet. Zu illustrativen Zwecken wurde der Marktwert dieser Mengen für einige Metalle abgeschätzt.

Diese Ergebnisse zeigen klar, dass ein grosses, nicht ausgeschöpftes Rückgewinnungspotential der STM aus EEG in Alt-Fhz vorhanden ist. Durch den Ausbau der STM-enhaltenden EEG aus Fahrzeugen und die anschliessende Behandlung in auf Elektroschrott spezialisierten Recyclinganlagen könnte ein Grossteil dieser Metalle zurückgewonnen werden.

5 Schlussfolgerungen und Perspektiven

5.1.1 Relevanz der STM in EEG

Der vorliegende Synthesebericht fasst die Aktivitäten im Rahmen des Projekts EVA II zusammen. Die Bedeutung aus Ressourcensicht der in Fahrzeugelektronik enthaltenen STM konnte mehrfach bestätigt werden. Laut wissenschaftlicher Literatur wird erwartet, dass der Anteil an EEG in Fahrzeugen weiter steigt und mit der Elektrifizierung der Fahrzeugflotte weitere neue Gerätetypen hinzukommen. Mit der Veränderung der Schweizer Fahrzeugflotte ergeben sich mit einer Verzögerung – welche der Lebensdauer eines Fahrzeugs entspricht – auch Veränderungen der STM Massenflüsse im Altfahrzeugstrom. Das dMFA Modul und Materialverwertungsmodul zeigen die Materialströme im Schweizer (Alt-)fahrzeugssystem. Der Ausbau von EEG in Fahrzeugen würde den Anteil in der Schweiz verbleibenden Altfahrzeuge betreffen, welcher im Jahr 2020 ungefähr 20% des Abflusses der Flotte ausmachte. In den letzten Jahren wurden ca. 80% der Schweizer Altfahrzeuge exportiert, was bedeutet, dass ein großer Teil der Massenflüsse im Modell nicht abgebildet wird [49].

5.1.2 Wirtschaftliche und ökologische Aspekte des Ausbaus und Recycling von EEG

Mit dem in diesem Bericht präsentierten Gesamtmodell wurden die Kosten des Ausbaus, des Transports und des Recyclings von EEG für die verschiedenen Gerätetypen und Gerätekategorien wie auch den durch verbessertes Recycling erzielte Umweltutzen ermittelt. Dieser wird für nahezu alle untersuchten EEG als positiv beurteilt. Besonders der Gerätetyp "Scheinwerfer" sowie Gerätetypen der Gerätekategorie "Steuergerät" erreichen durch den Ausbau einen hohen Umweltutzen im Vergleich zur Behandlung in einem Grossschredder. Die Kosten des Ausbaus und Recyclings für die Gesamtmasse eines Gerätetyps pro durchschnittlichem Fahrzeug betragen zwischen 4 bis 10 CHF. Die Kosten des Ausbaus und Recyclings aller EEG in einem durchschnittlichen Fahrzeug werden auf 190 CHF geschätzt. Dies entspricht ungefähr den Kosten der obligatorischen Trockenlegung. Im Vergleich zum Kaufpreis eines Neuwagens in der Schweiz bewegen sich die Kosten des Szenarios "EEG Ausbau" im Bereich von 0.5%.

Das Materialverwertungsmodul und Ökobilanzmodul berücksichtigen die im heutigen E-Schrott Recyclingsystem zurückgewonnenen Materialien. EEG sind wie erläutert mit der Zusammensetzung von hochwertiger IT- und Unterhaltungselektronik vergleichbar. Wie Kapitel 3 aufgezeigt, sind in Fahrzeugen (insbesondere Fahrzeuge mit Elektroantrieb) zusätzlich grosse Mengen an Permanentmagneten enthalten, welche STM beziehungsweise Seltenerdmetalle wie Neodym und Dysprosium enthalten. Der Aufbau von Recyclingkapazitäten für diese STM aus Altfahrzeugen würde die Rückgewinnung dieser wichtigen Metalle ermöglichen.

5.1.3 Verluste von STM und andere Wertstoffe im RESH

Das Projekt EVA II umfasste auch die Entwicklung eines Monitoringinstrument zur Bewertung der Menge der STM, welche im heutigen System im RESH landen. Es wurde eine umfassende Methodik (Probennahme – und Analyseprotokoll) entwickelt, welche genau und präzise ist. Die Methodik kann in Zukunft für das Monitoring der STM im Altfahrzeugrecyclingsystem verwendet werden. Sie kann die Veränderung der Materialflüsse aufgrund des Szenarios "EEG Ausbau" im Rahmen der VREG messen. Wenn man die Ergebnisse dieses Experiments hochrechnet, so schätzt man, dass in der Schweiz jedes Jahr etwa 240 Tonnen Cu, 290 kg Nd oder 5,5 kg Au im RESH verloren gehen (für vollständige Ergebnisse und Erklärungen siehe Kapitel 4).

6 Literaturverzeichnis

- [1] P. Wäger, R. Widmer, and A. Stamp, 'Scarce technology metals - applications, criticalities and intervention options', Federal Office of the Environment, Bern, Official report, Sep. 2011. [Online]. Available: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/fachinfo-daten/scarce_technologymetals-applicationscriticalitiesandintervention.pdf.download.pdf/scarce_technologymetals-applicationscriticalitiesandintervention.pdf
- [2] A. Haarman, R. Widmer, and R. Hischer, 'Projekt EVA: Elektronik – Verwertung - Altautos: Ökobilanz von STM-Rückgewinnungsoptionen - Schlussbericht zum Arbeitspaket C4', Empa, Schlussbericht, Jun. 2018.
- [3] B. für U. B. | O. fédéral de l'environnement O. | U. federale dell'ambiente UFAM, 'Seltene technische Metalle'. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-abfall/abfall--fachinformationen/abfallmengen-und-material--stofffluesse/seltene-technische-metalle.html> (accessed May 12, 2022).
- [4] U. N. E. Programme and I. R. Panel, *Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure*. 2013. Accessed: May 16, 2022. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/8423>
- [5] C. Hagelüken and C. Meskers, 'Mining our computers - opportunities and challenges to recover scarce and valuable materials', Sep. 2008.
- [6] S. R. Mueller, P. A. Wäger, R. Widmer, and I. D. Williams, 'A geological reconnaissance of electrical and electronic waste as a source for rare earth metals', *Waste Management*, vol. 45, pp. 226–234, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.03.038.
- [7] E. Restrepo, A. N. Løvik, A. Haarman, and R. Widmer, 'Projekt EVA: Elektronik – Verwertung – Altautos: "Zusammenfassung der Aktivitäten und Resultate": Zusammenfassung EVA und Schlussbericht zum Arbeitspaket C5', Empa, St. Gallen, Jun. 2018.
- [8] F. Blaser, R. Widmer, and P. Wäger, 'Verwertung seltener Metalle aus der Automobilelektronik in der Schweiz: Systemübersicht und Probenahmekonzept', Empa, St. Gallen, Schweiz, Feb. 2012.
- [9] R. Widmer, X. Du, O. Haag, E. Restrepo, and P. Wäger, 'Verwertung seltener Metalle aus der Automobilelektronik: Modul 2: Probenahme sowie Aufbereitung und Analyse, Modul 3: Auswertung und Diskussion der Resultate sowie Massnahmen zur Optimierung des Systems', 2015.
- [10] E. Restrepo, A. Loevik, and R. Widmer, 'Projekt EVA Szenarien und Dynamik: Schlussbericht zu der Arbeitspaket C3', St. Gallen, 2018.
- [11] A. Haarman, R. Widmer, and R. Hischer, 'Projekt EVA: Elektronik – Verwertung - Altautos: Ökobilanz von STM-Rückgewinnungsoptionen - Schlussbericht zum Arbeitspaket C4', Empa, Schlussbericht, Jun. 2018.
- [12] Amund Loevik and Rolf Widmer, 'Projekt EVA: Elektronik – Verwertung – Altautos: "Vorbereitungen zu den RESH-Verbrennungsversuchen" - Schlussbericht zum Arbeitspaket C2 "Datenunsicherheit in MFA"', Empa, St. Gallen, Schweiz, Jun. 2018.
- [13] 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.
- [14] E. Restrepo, A. Loevik, and R. Widmer, 'Projekt EVA: Existierender EAG Ausbau aus AltFhz; EAG Entnahmetests; Entfrachtungstests von AltFhz: Zwischenbericht zu den Arbeitspaketen A1, A2 und A3.', St. Gallen, Schweiz, 2017.

- [15] E. Restrepo, A. N. Løvik, P. Wäger, R. Widmer, R. Lonka, and D. B. Müller, 'Stocks, flows and distribution of critical metals in embedded electronics in passenger vehicles', *Environmental Science & Technology*, vol. 51, no. 3, pp. 1129–1139, 2017, doi: 10.1021/acs.est.6b05743.
- [16] E. Restrepo, A. N. Løvik, R. Widmer, P. Wäger, and D. B. Müller, 'Historical Penetration Patterns of Automobile Electronic Control Systems and Implications for Critical Raw Materials Recycling', *Resources*, vol. 8, no. 2, p. 58, 2019, doi: 10.3390/resources8020058.
- [17] E. Restrepo, A. N. Løvik, R. Widmer, P. Wäger, and D. B. Müller, 'Effects of car electronics penetration, integration and downsizing on their recycling potentials', *Resources, Conservation & Recycling: X*, p. 100032, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.rcrx.2020.100032.
- [18] A. N. Løvik, C. Marmy, E. Restrepo, and R. Widmer, 'Projekt EVA II: Dynamisches Stoffflussmodul - Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2020.
- [19] C. Marmy, M. Capelli, and H. Böni, 'Projekt EVA II: Materialverwertungsmodul - Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2023.
- [20] C. Marmy, M. Capelli, and H. Böni, 'Projekt EVA II: Wirtschaftsmodul - Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2023.
- [21] C. Marmy et al., 'Projekt EVA II: Elektronik - Verwertung - Altautos Eingebettete Elektronikgeräte in Personenfahrzeugen Arbeitspaket 3.3: Ökobilanzmodul Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, Feb. 2022.
- [22] C. Marmy, N. Bartolomé, U. Marseiler, L. Toledo, M. Capelli, and H. Böni, 'Projekt EVA II: Versuche, Datenbeschaffung und Datenbanken - Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2023.
- [23] C. Marmy, 'Projekt EVA II: Zukünftige Materialflüsse in der Fahrzeugflotte - Schlussbericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2023.
- [24] C. Marmy, M. Capelli, and H. Böni, 'Projekt EVA II: Synthesebericht', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, 2023.
- [25] A. N. Løvik, C. Marmy, E. Restrepo, and R. Widmer, 'Projekt EVA II: Elektronik – Verwertung - Altautos Dynamisches Stoffflussmodell Schlussbericht zum Arbeitspaket 3.1', Empa, St. Gallen, Projektbericht - nicht öffentlich publiziert, May 2020.
- [26] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema, 'The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology', *Int J Life Cycle Assess*, vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230, Sep. 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.
- [27] M. Capelli, 'Projekt EVA II Interview with Expert Logistics firm (Cargo24)'. Empa (not published), Nov. 02, 2022.
- [28] M. Capelli and C. Marmy, 'Projekt EVA II: Interview with Denis Lackovic and Roger Gnos from SWICO'. Empa (not published), Sep. 28, 2021.
- [29] M. Capelli, 'Projekt EVA II Interview with Markus Stengele, Expert from E-waste recycling company (SOREC)'. Empa (not published), Oct. 2021.
- [30] M. Capelli, 'Projekt EVA II: Interview with Thomas Ramseyer from Ramseyer Autoverwertung AG von VASSO'. Empa (not published), Nov. 10, 2021.
- [31] 'Aluminium – Analysis', IEA. <https://www.iea.org/reports/aluminium> (accessed Jan. 17, 2023).




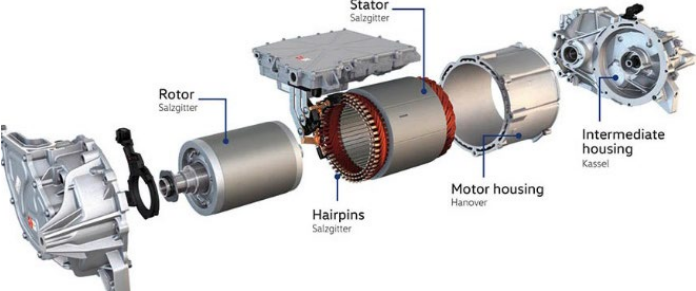

- [32] BFS, 'Strassenfahrzeuge im Jahr 2021: Neue Inverkehrsetzungen und Gesamtbestand | Bundesamt für Statistik', *Strassenfahrzeuge im Jahr 2021: Neue Inverkehrsetzungen und Gesamtbestand | Bundesamt für Statistik*, Jan. 31, 2022. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/aktuell/neue-veroeffentlichungen.gnpdetail.2022-0184.html> (accessed Feb. 07, 2022).
- [33] 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>
- [34] 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.
- [35] 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>
- [36] 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>
- [37] 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
- [38] 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>
- [39] AGVS and AutoScout24, 'Marktindex Personenwagen Schweiz'. Jan. 23, 2017. [Online]. Available: <https://www.agvs-zs.ch/de/news/news-archiv/neuwagenpreise-steigen-occasionspreise-bleiben-tief>
- [40] 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>
- [41] 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>
- [42] 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).
- [43] Auto-Schweiz, 'Alternative Antriebe', 2019. <https://www.auto.swiss/statistiken/alternative-antriebe> (accessed May 12, 2019).
- [44] O. fédéral du développement territorial ARE, 'Microrecensement mobilité et transports'. <https://www.are.admin.ch/are/fr/home/verkehr-und-infrastruktur/grundlagen-und-daten/verkehrsverhalten.html> (accessed Jul. 07, 2020).






- [45] 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
- [46] '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).
- [47] 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
- [48] European Alternative Fuels Observatory, 'European Alternative Fuels Observatory: Switzerland', 2019. <https://www.eafo.eu/countries/european-union/23640/summary/compare> (accessed May 12, 2019).
- [49] SARS, 'Geshredderte Fahrzeuge 2008-2018', Stiftung Autorecycling Schweiz, Bern, 2019.
- [50] SARS, 'Annual Report 2019', Stiftung Auto-Recycling Schweiz, 2020. [Online]. Available: <https://stiftung-autorecycling.ch/downloads>
- [51] SARS, 'Annual Report 2020', Stiftung Auto-Recycling Schweiz, 2021. [Online]. Available: <https://stiftung-autorecycling.ch/downloads>
- [52] R. Schmuck, 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.
- [53] J. Mehr, 'The environmental performance of enhanced metal recovery from dry municipal solid waste incineration bottom ash', *Waste Management*, p. 12, 2021.
- [54] J. Böni, 'Bestimmung des Restmetallgehalts in der aufbereiteten Trockenschlacke der ZAV Recycling AG', p. 94.
- [55] ZAV Recycling AG, 'Thermo-Recycling: Effiziente Gewinnung von Wertstoffen aus der Trockenschlacke', 2017. [Online]. Available: https://zar-ch.ch/fileadmin/user_upload/Contentdokumente/Oeffentliche_Dokumente/Faktenblatt_ZAR.pdf
- [56] I. Vermeulen, 'Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation', *Journal of Hazardous Materials*, 2011, doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.02.088.
- [57] K. Modis and K. Papaodysseus, 'Theoretical Estimation of the Critical Sampling Size for Homogeneous Ore Bodies with Small Nugget Effect', *Math Geol*, vol. 38, no. 4, pp. 489–501, May 2006, doi: 10.1007/s11004-005-9020-x.






Anhang A Liste der identifizierten Gerätetypen


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





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

<p>ID 05</p> <p>Gerätetyp Drosselklappensteller</p> <p>Standardbezeichnung ThrottleActuator</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p>	
<p>ID 06</p> <p>Gerätetyp DCDC Wandler</p> <p>Standardbezeichnung DCDCConverter</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p>	
<p>ID 07</p> <p>Gerätetyp Elektrischer Antriebsmotor Induktion</p> <p>Standardbezeichnung BEVDriveMotorInduction</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p>	
<p>ID 08</p> <p>Gerätetyp Elektrischer Antriebsmotor Permanentmagnet</p> <p>Standardbezeichnung BEVDriveMotorPM</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p>	
<p>ID 09</p> <p>Gerätetyp Fensterheber</p> <p>Standardbezeichnung ElectricWindowsMotor</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p>	

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

<p>ID 15</p> <p>Gerätetyp Kühlerlüftermotor</p> <p>Standardbezeichnung HeaterAndACFanMotor</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p>	
<p>Quelle: https://www.autodoc.de/tyc/7489545</p> <p>ID 16</p> <p>Gerätetyp Lautsprecher</p> <p>Standardbezeichnung Speaker</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p>	
<p>Quelle: https://www.multiplanet.ch/lautsprecher-bass/fahrzeugspezifische-systeme-lautsprecher/mercedes1586/#page=1&specialsOnly=0</p> <p>ID 17</p> <p>Gerätetyp On-board Ladegerät (Elektrofahrzeug)</p> <p>Standardbezeichnung BatteryCharger</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p>	
<p>Quelle: https://wheele.de/produkt/on-board-charger/</p> <p>ID 18</p> <p>Gerätetyp Externes Ladekabel (Elektrofahrzeug)</p> <p>Standardbezeichnung ChargeCord</p> <p>Geräteklasse Kabel</p>	
<p>Quelle: https://www.khonseve.com/product/ev-1-phase-charger/</p> <p>ID 19</p> <p>Gerätetyp Scheibenwischermotor</p> <p>Standardbezeichnung WiperMotor</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p>	
<p>Quelle: https://www.b-parts.com/en/store/products/2343901/rear-wiper-motor-audi-a6-allroad-c6-4fh-32-fsi-quattro-4f9955711b-e1-b6-8-1-2006-2007-2008-2009-2010-2011/</p>	

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

<p>ID 24</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Bordnetz/Karosserie</p> <p>Standardbezeichnung BodyControlModule</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p>	
<p>ID 25</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Bremse und Fahrwerk (z.B. ABS, ESC)</p> <p>Standardbezeichnung BrakeSystemControlUnit SelfLevelingSuspensionController</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p>	
<p>ID 26</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Fahrassistenz</p> <p>Standardbezeichnung AdaptiveCruiseControlController ElectronicPowerSteeringController ParkAssistantController</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p>	
<p>ID 27</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Fahrassistenzsensoren</p> <p>Standardbezeichnung ParkingCameraController SignRecognitionCameraController ParkingRadarController</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p>	





<p>ID 28</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Infotainment (Sound-, Navi-, und Multimedia)</p> <p>Standardbezeichnung InfotainmentNavigationSystem NavigationSystem SoundSystem</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p>	
<p>ID 29</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Insassenschutz (z.B. Airbagsteuerung)</p> <p>Standardbezeichnung AirbagController</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p>	
<p>ID 30</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Klimaautomatik</p> <p>Standardbezeichnung HabitableClimateController SeatHeatingController</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p>	
<p>ID 31</p> <p>Gerätetyp Steuermodul/Schieberkasten autom. Getriebe</p> <p>Standardbezeichnung TransmissionControlUnit</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p>	






Quelle: [VW Display and Control Panel Genuine Volkswagen Part OE-Nr. 6C0-035-8, 399,90 € \(bus-ok.de\)](http://bus-ok.de)

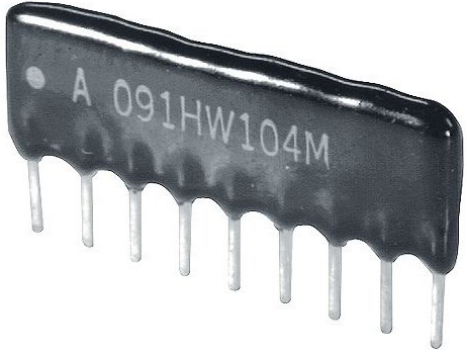

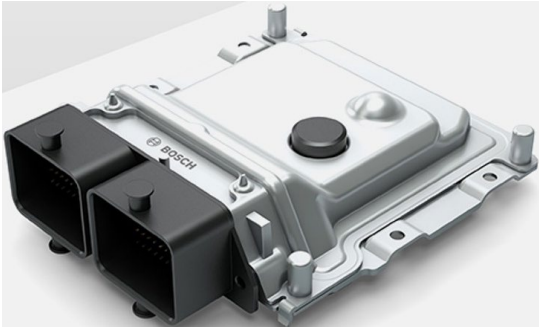
Quelle: <https://www.endera.de/airbagsteuergeraet-reparatur-vw-golf-iv.html>

Quelle: <https://autodogs.de/produkt/bmw-e90-e91-klimabedienteil-bedienteil-klimaautomatik-6199260-klima-schalter/>

Quelle: <https://classicparts.de/Schieberkasten-fuer-4-Gang-Automatikgetriebe-Getriebekennbuchstabe-APCCBYCFBAPECBZCFCAPBCFA-Corrado>

<p>ID 32</p> <p>Gerätetyp Waschwasserpumpe</p> <p>Standardbezeichnung WindshieldWasherPump</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.biltema.dk/en-dk/car---mc/car-spares/washer-equipment/washer-pumps/washer-pump-2000038246</p>	
<p>ID 33</p> <p>Gerätetyp Zentralverriegelung</p> <p>Standardbezeichnung DoorLockActuator</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.autodoc.de/autoteile/schlosser-aussen-10787</p>	
<p>ID 34</p> <p>Gerätetyp Verstärker</p> <p>Standardbezeichnung AudioAmplifier</p> <p>Geräteklasse Steuergerät</p> <p>Quelle: https://www.techinn.com/en/sony-xmn1004-car-amplifier/137910321/p</p>	
<p>ID 35</p> <p>Gerätetyp Lufteinspritzpumpe</p> <p>Standardbezeichnung EngineAirInjectionPump</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.fcpeuro.com/products/bmw-air-pump-e46-pierburg-11727553056</p>	

<p>ID 36</p> <p>Gerätetyp Ladeklappen (Elektrofahrzeug)</p> <p>Standardbezeichnung PlugInsertPanel</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://akro-plastic.com/de/aktuelles/praxisbeispiele/ladeklappen-e-auto/</p>	
<p>ID 37</p> <p>Gerätetyp Tür-, Heckklappen- oder Schiebedachmotor</p> <p>Standardbezeichnung DoorHatchMotor SunroofMotor</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.amazon.de/T%C3%BCrschloss-Motorschloss-motorsperre-Lenkschloss-Radmotor/dp/B084P484W4</p>	
<p>ID 38</p> <p>Gerätetyp Servolenkungsaktuator</p> <p>Standardbezeichnung PowerSteeringActuator</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://www.caranddriver.com/features/a27888229/power-steering/</p>	
<p>ID 39</p> <p>Gerätetyp Spiegelverstellungsmotor</p> <p>Standardbezeichnung MirrorMotor</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p> <p>Quelle: https://w220.wiki/File:W220_exterior_mirror_motor_A2038202242_opened_inside.jpg</p>	
<p>ID 40</p> <p>Gerätetyp Steuergerät Start Stop</p> <p>Standardbezeichnung StartStopController</p> <p>Geräteklasse Controller</p> <p>Quelle: https://www.franceauto.pl/de_DE/p/Start-Stop-Steuergerat-Citroen-Berlingo-III-C3-II-C3-Picasso-C4-II-C4-Cactus-C4-Picasso-II-DS3-DS4-DS5-Peugeot-2008-208-3008-308-II-5008-508-Partner-III-9805721280/58524</p>	

<p>ID 41</p> <p>Gerätetyp Kondensator-Array für EV</p> <p>Standardbezeichnung CapacitorsEV</p> <p>Geräteklasse Controller</p>	
<p>ID 42</p> <p>Gerätetyp Verteilergetriebe</p> <p>Standardbezeichnung TransferShiftActuator</p> <p>Geräteklasse Aktuator</p>	
<p>ID 43</p> <p>Gerätetyp Vehicle Control Unit</p> <p>Standardbezeichnung VehicleControlUnit</p> <p>Geräteklasse Controller</p>	

Quelle: <https://www.distrelec.ch/en/ceramic-capacitor-array-100nf-50v-20-hosonic-8c7-104m50x/p/16572366>

Quelle: <https://bs-getriebetechnik.de/BMW-X3-Verteilergetriebe-generalueberholt-27103455137-27103455135-Bj-2003-2011>

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

Anhang B Liste der EEG Bestandteile

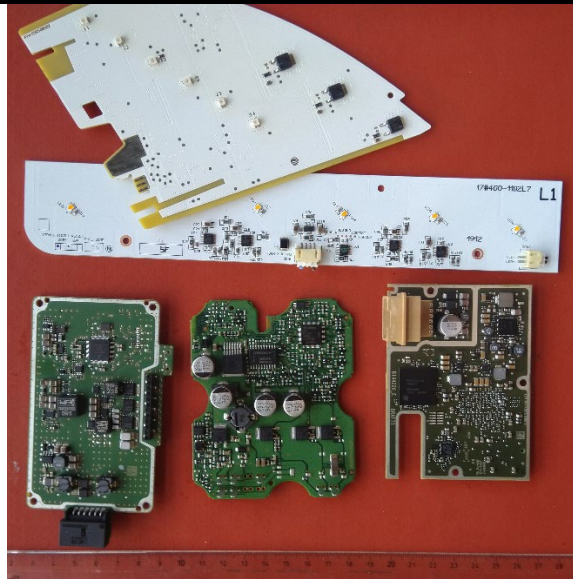
Bestandteil	Name in Datenbank	Enthalten in	Enthaltene relevante Materialien
Leiterplatte	PCB	Aktuatoren, Scheinwerfer	Controller, Edelmetalle (Gold, Silber, Platin), Kupfer, Kunststoffe
Stecker	Cables and connectors	Controller	Kunststoffe, Kupfer
Motor	Motor	Aktuatoren	Eisen, Kupfer, Neodym
Bildschirm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

Komponente

Leiterplatte

Beschreibung

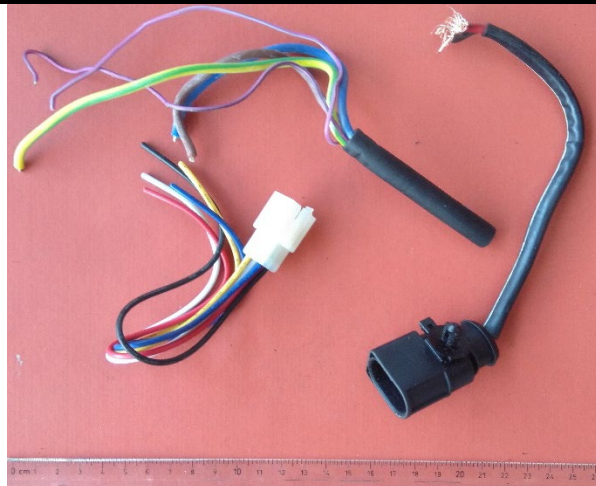
Eine Leiterplatte (engl. Printed circuit board, PCB) ist ein Träger aus Kunststoff für elektronische Bauteile (Kondensatoren, Prozessoren, elektrische Widerstände, etc.). Diese befindet sich unter anderem in Steuergeräten und enthält Kupfer (Cu) und viele Arten von Seltenen Technologie Metalle (STM),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

**Komponente**

Kabel und Steckverbinder

Beschreibung

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



komponente

Motor

Beschreibung

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

**Komponente**

Bildschirm

Beschreibung

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

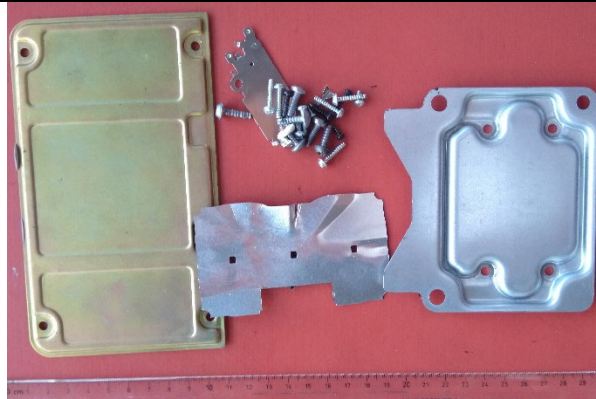


Komponente

Fe-Teile

Beschreibung

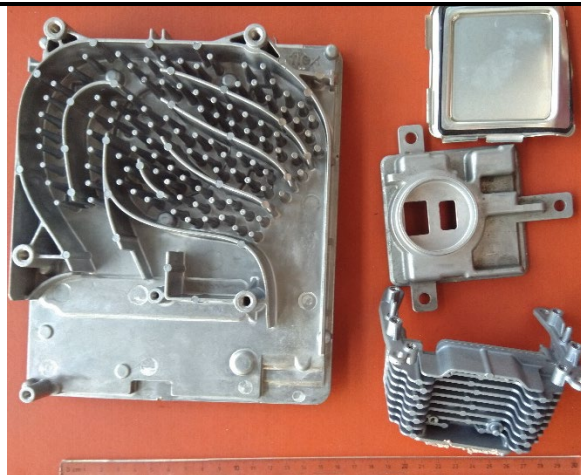
Eisen (Fe) als Element besitzt die Eigenschaften breite Verfügbarkeit (die es zu einem preiswerten Rohstoff macht) sowie Zähigkeit und Festigkeit von Eisenlegierungen. Es wird in der Regel nicht reines Fe verwendet, sondern Stahl oder Legierungen (z.B. Edelstahl), um gewisse Eigenschaften zu verbessern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

**Komponente**

Al-Teile

Beschreibung

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

**Komponente**

Cu-Teile

Beschreibung

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



Komponente

Licht/LED

Beschreibung

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

**Komponente**

Kunststoff-Teile

Beschreibung

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

**Komponente**

Magnet

Beschreibung

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



Komponente

Andere Metalle

Beschreibung

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



Komponente

Elektrisches Kabel

Beschreibung

Elektrische Kabel können in einer Vielzahl von Gerätetypen enthalten sein, z.B. in Batterieladegeräten oder Ähnlichem. Enthalten vor allem Kupfer oder Kupferlegierungen, sowie Kunststoffe. Der Unterschied zur Kategorie der Kabel und Steckverbindungen besteht im Durchmesser der Kabel. Elektrische Kabel weisen einen Durchmesser von ca. 1 cm auf.

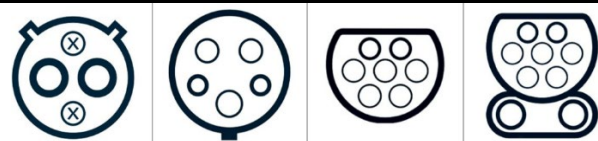


Komponente

Stecker zu elektrischem Kabel

Beschreibung

Verschiedene Steckertypen (Bild: von links nach rechts): CHAdeMO-Stecker, Typ 1-Stecker, Typ 2-Stecker, Combo-Stecker. Enthalten vor allem Kupfer und Kupferlegierungen. Können manchmal andere Metalle enthalten für die Steckverbindungen, sowie Kunststoffe oder aber auch Eisen für die strukturellen Bestandteile.



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



Komponente

Rest

Beschreibung

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



Anhang C Parameter aus dem Materialverwertungsmodul

Tabelle 12: Anteil der gesamten Recyclinginputmasse die jeden Behandlungs- und Transportprozess durchläuft, pro Gerätekategorie und Szenario

Prozess Beschreibung	ID	Massenanteile für "Baseline"				Massenanteile für "EEG Ausbau"			
		Scheinwerfer	Aktuatoren	Controller	Kabel	Scheinwerfer	Aktuatoren	Controller	Kabel
Dismantling from car	5	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_1	1.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Manual Dismantling	17	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_2	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_3	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Mechanical treatment	18	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_9	9.7E-02	6.4E-02	1.4E-01	0.0E+00	9.7E-02	6.4E-02	1.4E-01	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_4	1.7E-03	3.6E-02	3.2E-02	0.0E+00	1.7E-03	3.6E-02	3.2E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_5	2.8E-02	6.1E-02	8.0E-02	0.0E+00	2.8E-02	6.1E-02	8.0E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_6	3.4E-02	1.1E-01	5.9E-02	0.0E+00	3.4E-02	1.1E-01	5.9E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_18	6.9E-02	1.5E-01	1.6E-01	0.0E+00	6.9E-02	1.5E-01	1.6E-01	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_13	5.2E-02	1.9E-01	3.2E-01	0.0E+00	5.2E-02	1.9E-01	3.2E-01	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_7	7.1E-01	3.7E-01	1.9E-01	4.9E-01	7.1E-01	3.7E-01	1.9E-01	4.9E-01
Transport by Truck EURO5	T_8	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	5.0E-01	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	5.0E-01
Metal Separation A (Fe, Cu and PM)	23	1.7E-03	3.6E-02	3.2E-02	0.0E+00	1.7E-03	3.6E-02	3.2E-02	0.0E+00
Metal Separation A (Fe, Cu and PM)	23	2.8E-02	6.1E-02	8.0E-02	0.0E+00	2.8E-02	6.1E-02	8.0E-02	0.0E+00
Metal Separation B (Al, Cu and PM)	24	3.4E-02	1.1E-01	5.9E-02	0.0E+00	3.4E-02	1.1E-01	5.9E-02	0.0E+00
Metal/Plastics Separation	25	6.9E-02	1.5E-01	1.6E-01	0.0E+00	6.9E-02	1.5E-01	1.6E-01	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_15	2.6E-04	5.3E-03	4.9E-03	0.0E+00	2.6E-04	5.3E-03	4.9E-03	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_10	1.1E-03	2.2E-02	2.0E-02	0.0E+00	1.1E-03	2.2E-02	2.0E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_16	1.6E-03	3.5E-03	4.6E-03	0.0E+00	1.6E-03	3.5E-03	4.6E-03	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_11	2.1E-02	4.5E-02	6.0E-02	0.0E+00	2.1E-02	4.5E-02	6.0E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_17	1.4E-03	4.5E-03	2.4E-03	0.0E+00	1.4E-03	4.5E-03	2.4E-03	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_12	2.1E-02	7.2E-02	3.7E-02	0.0E+00	2.1E-02	7.2E-02	3.7E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_19	6.4E-02	3.4E-02	2.0E-02	0.0E+00	6.4E-02	3.4E-02	2.0E-02	0.0E+00
Transport by Truck EURO5	T_14	4.7E-01	1.4E-01	7.4E-02	0.0E+00	4.7E-01	1.4E-01	7.4E-02	0.0E+00

Integrated copper smelter	26.1	5.0E-02	2.1E-02	2.7E-02	3.8E-01	3.2E-03	1.3E-02	1.2E-02	3.8E-01
Integrated copper smelter Precious metals	26.2	2.0E-05	5.0E-06	3.6E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Integrated copper smelter Precious metals	26.3	1.2E-04	3.8E-05	7.8E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Integrated copper smelter Precious metals	26.4	4.1E-06	5.9E-07	5.5E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Aluminium smelter	27	8.3E-02	2.0E-01	1.8E-01	0.0E+00	8.3E-02	2.0E-01	1.8E-01	0.0E+00
Iron smelter	28	7.2E-02	2.5E-01	3.9E-01	0.0E+00	7.2E-02	2.5E-01	3.9E-01	0.0E+00
Plastic recycler	29	4.7E-01	1.4E-01	7.4E-02	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Incineration	30	2.0E-01	2.6E-01	3.2E-01	6.3E-01	8.4E-01	5.3E-01	4.2E-01	6.3E-01

Tabelle 13: Anteil der gesamten Recycling-Input-Masse, die verwertet werden kann, pro Material/Element für jede Gerätekategorie und jedes Szenario.

Szenario	Gerätekategorie	Zurückgewonnene Massenanteile pro Material/Element										Verluste	
		Fe	Al	Cu	Au	Ag	Pd	PP	PMMA	ABS	PC/ABS		
Szenario "Baseline" ¹²	Scheinwerfer	0.072	0.083	0.003	0	0	0	0	0	0	0	0	0.842
	Aktuatoren	0.252	0.202	0.013	0	0	0	0	0	0	0	0	0.533
	Steuergeräte	0.388	0.181	0.012	0	0	0	0	0	0	0	0	0.419
	Kabel	0	0	0.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0.625
Szenario "EEG Ausbau"	Scheinwerfer	0.072	0.083	0.050	2E-05	1E-04	4E-06	0.018	0.201	0.133	0.122	0.122	0.321
	Aktuatoren	0.252	0.202	0.021	5E-06	4E-05	6E-07	0.010	0.000	0.071	0.065	0.065	0.380
	Steuergeräte	0.388	0.181	0.027	4E-05	8E-05	5E-06	0.005	0.000	0.036	0.033	0.033	0.330
	Kabel	0.000	0.000	0.375	0E+00	0E+00	0E+00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.625
Unterschied zwischen "EEG Ausbau" und "Baseline"	Scheinwerfer	0	0	0.047	2E-05	1E-04	4E-06	0.018	0.201	0.133	0.122	0.122	-0.521
	Aktuatoren	0	0	0.008	5E-06	4E-05	6E-07	0.010	0	0.071	0.065	0.065	-0.153
	Steuergeräte	0	0	0.015	4E-05	8E-05	5E-06	0.005	0	0.036	0.033	0.033	-0.089
	Kabel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

¹² Zur Abschätzung der Mengen an Stoffen und Elementen, die in einem Großschredder aus dem EEG zurückgewonnen werden (Szenario "Baseline"), wurde davon ausgegangen, dass der Behandlungsprozess ähnlich wie in einer E-Schrott-Recyclinganlage abläuft, jedoch ohne die Produktion der Fraktionen "Leiterplatten" und "Kunststoffe", deren Stoffe in den RESH gelangen. Da das RESH anschließend verbrannt wird, gehen die darin enthaltenen Elemente und Stoffe verloren.

Anhang D Wichtige Parameter und Hauptergebnisse des Gesamtmodells

Tabelle 14: Wichtige Parameter und Inputdaten

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

Gerätetyp			Parameter und Inputdaten								
ID	Name	Kategorie	Durchschn. Masse	Durchschn. Ausbauezeit		Ausbauanteil gebrauchte Ersatzteile	Durchschnittlichen Anzahl pro Alt-Fhz				
			[g]	[min]	Unsicherheitsgrad		Alle	ICEV	HEV	PHEV	BEV
17	On-boardLadegerät(für xEVs)	Steuergerät		10.00	(+)	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
18	ExternesLadekabel(für xEVs)	Kabeln		0.00	(+)	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
19	Scheibenwischermotor	Aktuator	1'544	6.71	+++	0.75	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
20	Scheinwerfer(vorne und hinten)	Scheinwerfer	2'223	1.12	+++	0.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
21	Sicherungsbox/Verteiler	Steuergerät	593	2.25	++	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
22	Sitzverstellungsmotor	Aktuator	1'030	1.54	++	0.00	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
23	SteuergerätAntriebsmotor	Steuergerät	712	6.66	+++	0.74	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
24	SteuergerätBordnetz/Karosserie	Steuergerät	350	2.75	+++	0.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
25	SteuergerätBremsenundFahrwerk(z.B.ABS,ESC)	Steuergerät	813	4.63	(+)	0.16	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
26	SteuergerätFahrassistentz	Steuergerät	1'074	2.91	+++	0.05	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
27	SteuergerätFahrassistentz-sensoren	Steuergerät	355	1.49	+++	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
28	SteuergerätInfotainment(Sound-,Navi-,undMultimedia)	Steuergerät	1'610	2.73	+++	0.09	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
29	SteuergerätInsassenschutz	Steuergerät	282	9.07	+++	0.17	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

Gerätetyp			Parameter und Inputdaten								
ID	Name	Kategorie	Durchschn. Masse	Durchschn. Ausbauzeit		Ausbauanteil gebrauchte Ersatzteile	Durchschnittlichen Anzahl pro Alt-Fhz				
			[g]	[min]	Unsicherheitsgrad		Alle	ICEV	HEV	PHEV	BEV
30	SteuergerätKlimaautomatik	Steuergerät	362	0.90	+++	0.07	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
31	Steuermodul/Schieberkasten-automatischesGetriebe	Steuergerät	1'635	0.97	++	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
32	Waschwasserpumpe	Aktuator	101	0.34	++	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
33	Zentralverriegelung	Aktuator	716	1.48	+++	0.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
34	Verstärker	Steuergerät	1'672	0.78	+	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
35	Lufteinspritzpumpe	Aktuator	1'295	15.00	(+)	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
36	Ladeklappe(fürxEVs)	Aktuator	706	0.50	(+)	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
37	Tür-,Heckklappen-oderSchiebedachmotor	Aktuator	419	0.59	+	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
38	Servolenkungsaktuator	Aktuator	2'164	4.78	+++	0.30	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
39	Spiegelverstellungsmotor	Aktuator	165	0.50	(+)	0.00	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
40	SteuergerätStartStop	Steuergerät	450	0.43	+	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
41	Kondensator-Array(fürxEVs)	Steuergerät				0.00	0.01	0.00	1.00	1.00	1.00
42	Verteilergetriebe	Aktuator	1'399	30.00	(+)	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
43	VehicleControlUnit(fürxEVs)	Steuergerät		4.63	(+)	0.00	0.01	0.00	1.00	1.00	1.00

Legende Unsicherheitsgrad

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

Tabelle 15: Hauptergebnisse des Gesamtmodells

Gerätetyp		Kategorie	Kosten pro Alt-Fhz				Umweltnutzen pro Alt-Fhz		
ID	Name		Ausbau CHF	Transport CHF	Recycling CHF	Gesamt CHF	UBP 2021	EF 3.0	GWP [kg CO2 eq]
01	Aktuatoren aktives Fahrwerk	Aktuator	2.13	0.86	0.24	3.23	1.2E+04	2.0E-03	5.2E+00
02	Aktuatoren Bremsanlage (z.B. ABS, ESC)	Aktuator	10.97	0.30	0.08	11.36	4.1E+03	6.9E-04	1.8E+00
03	Anlasser	Aktuator	15.11	0.35	0.10	15.56	4.8E+03	8.1E-04	2.1E+00
04	Batterie Management System	Aktuator	0.15	0.00	0.00	0.15	4.5E+00	7.7E-07	2.0E-03
05	Drosselklappensteller	Aktuator	1.79	0.11	0.03	1.93	1.5E+03	2.2E-03	6.9E-01
06	DCDC Wandler	Steuergerät	0.43	0.16	0.04	0.62	8.5E+03	2.6E-04	1.4E+00
07	Elektrischer Antriebsmotor Induktion (für xEVs)	Aktuator	0.01	0.00	0.00	0.01	4.6E+01	7.8E-06	2.1E-02
08	Elektrischer Antriebsmotor Permanentmagnet (für xEVs)	Aktuator	0.18	0.04	0.01	0.23	5.5E+02	9.4E-05	2.5E-01
09	Fensterheber	Aktuator	21.56	0.45	0.12	22.14	6.1E+03	1.0E-03	2.8E+00
10	Generator/Alternator	Aktuator	15.28	1.05	0.29	16.62	1.4E+04	2.4E-03	6.3E+00
11	Inverter (für xEVs)	Steuergerät	0.03	0.00	0.00	0.03	9.9E+02	2.5E-04	1.7E-01
12	Kombiinstrument/Info-Anzeige	Steuergerät	2.26	0.10	0.03	2.38	5.4E+03	1.4E-03	9.1E-01
13	Kabelbaum	Kabeln	2.41	0.34	0.09	2.84			
14	Kraftstoffpumpe	Aktuator	1.05	0.23	0.06	1.34	3.1E+03	5.3E-04	1.4E+00
15	Kühlerlüftermotor	Aktuator	8.89	0.45	0.12	9.47	6.1E+03	1.0E-03	2.7E+00

Gerätetyp		Kategorie	Kosten pro Alt-Fhz				Umweltnutzen pro Alt-Fhz		
ID	Name		Ausbau CHF	Transport CHF	Recycling CHF	Gesamt CHF	UBP 2021	EF 3.0	GWP [kg CO2 eq]
16	Lautsprecher	Aktuator	1.52	0.19	0.05	1.76	2.5E+03	4.3E-04	1.1E+00
17	On-board Ladegerät (für xEVs)	Steuergerät	0.00	0.00	0.00	0.00			
18	Externes Ladekabel (für xEVs)	Kabeln	0.00	0.00	0.00	0.00			
19	Scheibenwischermotor	Aktuator	3.50	0.15	0.04	3.69	2.0E+03	3.4E-04	8.9E-01
20	Scheinwerfer (vorne und hinten)	Scheinwerfer	6.35	2.30	0.63	9.28	1.4E+05	2.7E-02	5.0E+01
21	Sicherungsbox/Verteiler	Steuergerät	3.18	0.15	0.04	3.38	8.3E+03	2.1E-03	1.4E+00
22	Sitzverstellungsmotor	Aktuator	0.71	0.09	0.02	0.82	1.2E+03	2.0E-04	5.2E-01
23	Steuergerät Antriebsmotor	Steuergerät	1.94	0.04	0.01	1.99	2.1E+03	5.3E-04	3.5E-01
24	Steuergerät Bordnetz/Karosserie	Steuergerät	3.43	0.37	0.10	3.90	4.8E+03	1.2E-03	8.1E-01
25	Steuergerät Bremse und Fahrwerk (z.B. ABS, ESC)	Steuergerät	2.11	0.09	0.03	2.23	9.7E+03	2.5E-03	1.6E+00
26	Steuergerät Fahrassistenz	Steuergerät	10.52	0.06	0.02	10.59	1.4E+04	3.7E-03	2.4E+00
27	Steuergerät Fahrassistenzsensoren	Steuergerät	0.61	0.12	0.03	0.76	5.0E+03	1.3E-03	8.4E-01
28	Steuergerät Infotainment (Sound-, Navi-, und Multimedia)	Steuergerät	3.43	0.37	0.10	3.90	2.0E+04	5.2E-03	3.4E+00
29	Steuergerät Insassenschutz	Steuergerät	5.53	0.18	0.05	5.75	3.2E+03	8.3E-04	5.5E-01
30	Steuergerät Klimaautomatik	Steuergerät	3.91	0.26	0.07	4.24	4.7E+03	1.2E-03	8.0E-01
31	Steuermodul/Schieberkasten automatisches Getriebe	Steuergerät	1.37	0.42	0.12	1.91	2.3E+04	5.9E-03	3.9E+00

Gerätetyp		Kategorie	Kosten pro Alt-Fhz				Umweltnutzen pro Alt-Fhz		
ID	Name		Ausbau CHF	Transport CHF	Recycling CHF	Gesamt CHF	UBP 2021	EF 3.0	GWP [kg CO2 eq]
32	Waschwasserpumpe	Aktuator	0.48	0.03	0.01	0.51	3.5E+02	6.0E-05	1.6E-01
33	Zentralverriegelung	Aktuator	2.04	0.18	0.05	2.27	2.4E+03	4.1E-04	1.1E+00
34	Verstärker	Steuergerät	1.11	0.43	0.12	1.66	2.4E+04	6.0E-03	4.0E+00
35	Lufteinspritzpumpe	Aktuator	21.24	0.34	0.09	21.67	4.5E+03	7.7E-04	2.0E+00
36	Ladeklappen (für xEVs)	Aktuator	0.00	0.00	0.00	0.00	2.1E+00	3.5E-07	9.3E-04
37	Tür-, Heckklappen- oder Schiebendachmotor	Aktuator	0.42	0.05	0.01	0.49	7.3E+02	1.2E-04	3.3E-01
38	Servolenkungsaktuator	Aktuator	0.66	0.05	0.01	0.73	7.4E+02	1.3E-04	3.3E-01
39	Spiegelverstellungsmotor	Aktuator	0.55	0.03	0.01	0.59	4.4E+02	7.6E-05	2.0E-01
40	Steuergerät Start Stop	Steuergerät	1.18	0.09	0.02	1.29	6.3E+03	1.6E-03	1.1E+00
41	Kondensator-Array (für xEVs)	Steuergerät	0.00	0.00	0.00	0.00			
42	Verteilergetriebe	Aktuator	21.25	0.18	0.05	21.48	2.4E+03	4.2E-04	1.1E+00
43	Vehicle Control Unit (für xEVs)	Steuergerät	0.01	0.02	0.00	0.03			

