

# **Dynamisches Stoffflussmodul**

Schlussbericht

## **Auftraggeber**

Arbeitsgruppe Projekt EVA II:

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

Begleitung Bundesamt für Umwelt: Isabelle Baudin

## **Bearbeitung**

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

## **Autoren**

Amund N. Løvik <sup>1</sup>

Charles Marmy <sup>1</sup>

Eliette Restrepo <sup>1</sup>

Rolf Widmer <sup>1</sup>

**Titelbild:** ©C. Marmy, 2022

## **Hinweis**

Diese Studie wurde mit finanzieller Unterstützung von BAFU durchgeführt. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

St. Gallen, Mai 2020

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Projekt-Hintergrund und -Ziele .....	1
1.2	Ziele des dynamischen Stoffflussmodells.....	2
<b>2</b>	<b>Methodik .....</b>	<b>3</b>
2.1	Systemdefinition .....	3
2.2	Modellebenen .....	5
2.3	Mathematisches Modell.....	6
2.4	Daten und Annahmen zur Quantifizierung von exogenen Variablen .....	13
2.5	Umsetzung und Funktionalität .....	22
<b>3</b>	<b>Resultate .....</b>	<b>23</b>
3.1	Vergleich von Modellergebnissen zu Statistiken .....	23
3.2	Antriebstypen im Bestand und unter den Altfahrzeugen .....	23
3.3	EEG im Abfluss .....	24
3.4	Gold, Neodym, Lanthan und Lithium im Abfluss.....	25
<b>4</b>	<b>Fazit und nächste Schritte .....</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>Referenzen .....</b>	<b>30</b>

## Tabellen

Tabelle 1	Notation für physikalische Grössen und Modellvariablen.....	6
Tabelle 2	Notation für Aspekte und Dimensionen. ....	7
Tabelle 3	Beispiele für die Verwendung der Notation für Systemvariablen.....	7
Tabelle 4	Exogene Variablen (Inputdaten). ....	8
Tabelle 5	Variablen in der Fahrzeugebene und Gleichungen zu deren Berechnung. ....	9
Tabelle 6	Variablen in der Geräteebe und Gleichungen zu deren Berechnung.....	10
Tabelle 7	Variablen in der Bauteilebene und Gleichungen zu deren Berechnung. ....	11
Tabelle 8	Variablen in der Elementebene und Gleichungen zu deren Berechnung.....	12
Tabelle 9	In den Eingabedaten berücksichtigte Aspekte zur Anzahl der EEG pro Fahrzeug. ....	18
Tabelle 10	Anzahl Geräte pro Fahrzeug, nach Antriebtyp.....	19
Tabelle 11	Ausbauanteil der EEG. ....	19
Tabelle 12	Durchschnittliche Masse der EEG und Masseanteile der Bauteile in EEG. ....	21
Tabelle 13	Massenanteile der Elemente in Bauteilen.....	22



## Abbildungen

Abbildung 1	Systemdefinition.....	4
Abbildung 2	Übersicht über die verschiedenen Ebenen des Stoffflussmodells und ihre Schnittstellen.....	6
Abbildung 3	Struktur der für physikalische Grössen im mathematischen Modell verwendeten Notation. Die Beispiele in Tabelle 3 veranschaulichen die Verwendung der Notation.....	7
Abbildung 4.	Bestand der Personenwagen in der Schweiz nach BFS (historische Entwicklung) und Szenario bis 2060, aus dem Projekt EVA I. <sup>2</sup> .....	13
Abbildung 5	Ausfallraten. Vergleich zwischen Statistiken (Punkte) und die Ausfallrate der Weibullverteilung.....	14
Abbildung 6	Berechnete Ausfallraten, die als Inputdaten benutzt wurden. Links: Bis 40 Jahre Fahrzeugalter. Rechts: Die ersten 9 Jahre herangezoomt. ....	14
Abbildung 7	Marktanteile der Antriebstypen. Von 1988 bis 2019: von Statistiken. Ab 2020: Szenario.....	16
Abbildung 8	Anteil Exporte + unbekannter Verbleib aus dem Abfluss. Bis 2019: von Statistiken. Ab 2020: als konstant angenommen. ....	17
Abbildung 9	Anzahl Geräte pro Fahrzeug. Daten nach 2015: Annahmen.....	18
Abbildung 10	Vergleiche zwischen Modellresultaten (rot) und Statistiken (blau). Hinweis: Die Bilder unten in der Mitte und unten rechts zeigen die Anzahl der geschredderten Fahrzeuge während eines Jahres nach <i>Jahrgang</i> (x-Achse) der Fahrzeuge. ....	23
Abbildung 11.	Berechnete Anzahl Personenwagen in verschiedenen Massenströmen und dem Bestand nach Antriebstyp. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von Elektrofahrzeugen schnell wachsen und die nicht in der Schweiz verwerteten Altfahrzeuge auf dem heutigen Niveau von 75% bleiben. Dies stellt nur eine mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden. ....	24
Abbildung 12	Berechnete Anzahl der EEG in Alt- und Unfallfahrzeugen. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von Elektrofahrzeugen schnell wachsen. Dies stellt nur eine mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden.....	25
Abbildung 13	Berechnete Masse der EEG in Alt- und Unfallfahrzeugen. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von Elektrofahrzeugen schnell wachsen. Dies stellt nur eine mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden.....	25
Abbildung 14	Berechnete Masse von Gold in Alt- und Unfallfahrzeugen. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von	

	Elektrofahrzeugen schnell wachsen. Dies stellt nur eine mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden.....	26
Abbildung 15	Berechnete Masse von Neodym in Alt- und Unfallfahrzeugen. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von Elektrofahrzeugen schnell wachsen. Dies stellt nur eine mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden.....	26
Abbildung 16	Berechnete Masse von Lanthan in Alt- und Unfallfahrzeugen. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von Elektrofahrzeugen schnell wachsen. Dies stellt nur eine mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden.....	27
Abbildung 17	Berechnete Masse von Lithium in Alt- und Unfallfahrzeugen. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von Elektrofahrzeugen schnell wachsen. Dies stellt nur eine mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden.....	28

## Abkürzungsverzeichnis

AGVS	Autogewerbeverband Schweiz
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BEV	Battery Electric Vehicle (engl.); Fahrzeug mit reinem Elektroantrieb
dMFA	dynamic Material Flow Analysis (engl.); dynamisches Massenflussmodell
EAG	Elektronik Altgeräte
EEG	Eingebettete Elektronikgeräte in Fahrzeugen
EF3.0	Environmental Footprint Methode (Version 3.0)
EVA	Elektronik Verwertung Altautos
Fhz	Fahrzeug
GWP	Global Warming Potential (engl.); Treibhauspotenzial
HEV	Hybrid Electric Vehicle (engl.); Fahrzeug mit Hybridantrieb
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle (engl.); Fahrzeug mit Verbrennungsantrieb
JRC	"Joint Research Center" der 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 recykliert 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.



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



# 1 Einleitung

## 1.1 Projekt-Hintergrund und -Ziele

Das EVA II-Projekt ist der Nachfolger des Projekts EVA (Elektronik Verwertung Altautos)<sup>1</sup>. In EVA I wurde das Thema Recycling von Elektronikgeräten aus Altfahrzeugen in der Schweiz durch eine Reihe von Experimenten, Modellen und Datenanalysen untersucht. Das Projekt produzierte eine grosse Datenmenge und lieferte erste Schlussfolgerungen zu den umwelt- und ressourcenbezogenen Folgen einer allfällig obligatorischen Demontage und Entsorgung bestimmter, eingebetteter elektronischer Geräte (EEG). An die Arbeiten in EVA I anknüpfend besteht das erste Ziel des vorgeschlagenen EVA-II-Projekts darin, ein dauerhaftes System zur Überwachung (Monitoring) des Lebenszyklus von EEG in Autos und den darin enthaltenen seltenen Technologiemetallen (STM) einzurichten. Der übergeordnete Zweck des Monitors besteht darin, politische Entscheidungen über den Umgang mit Elektronik am Ende der Lebensdauer von Personenkraftwagen (PKW) zu informieren. Insbesondere soll der Monitor die Bereitstellung einer Liste von „Pflichtgeräten“, die vor dem Schreddern aus Fahrzeugen entfernt werden müssen, unterstützen. Der Monitor soll so ausgelegt sein, dass die durchzuführenden Experimente in den Verarbeitungsprozessen und mit den verwendeten Modellen in Zukunft leicht wiederholt, sowie technologischen Veränderungen, neuen Daten oder Vorgaben angepasst werden können. Das zweite Ziel von EVA II besteht darin, das durch den Monitor gewonnene Wissen in Gesetzgebung (VREG) und Vollzugshilfen zur Umsetzung der Gesetzgebung (Vollzugshilfe/Stand der Technik) einzubringen.

Systemmodelle sind unverzichtbare Werkzeuge zur Simulation von Änderungen am aktuellen System. Vier Modelle werden entwickelt und in EVA II integriert: 1) Ein dynamisches Stoffflussmodell wird verwendet, um die Anzahl und Masse der spezifischen EEG zu berechnen, die in den kommenden Jahren das Ende der Lebensdauer erreichen werden. 2) Ein Metallverwertungsmodell ermöglicht die Simulation verschiedener Verwertungswege und berechnet die rückgewonnene Masse spezifischer Metalle für bestimmte Geräte. 3) Zur Berechnung der Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit verschiedenen Verwertungsoptionen wird ein Ökobilanzmodell verwendet. 4) Ein Wirtschaftsmodell wird verwendet, um die wirtschaftlichen Auswirkungen politischer Massnahmen auf verschiedene Akteure und mögliche Finanzierungsmechanismen für ein obligatorisches Demontagesystem zu analysieren. Wenn alle Modelle entwickelt und verknüpft sind, werden Simulationen durchgeführt, um mögliche zukünftige Entwicklungen in verschiedenen Szenarien zu analysieren.

Dieser Bericht umfasst die Entwicklung und die Demonstration des dynamischen Stoffflussmodells sowie die mathematische Definition des Metallverwertungsmodells.

---

<sup>1</sup> Das EVA-Projekt wird in diesem Bericht als EVA I bezeichnet

## 1.2 Ziele des dynamischen Stoffflussmodells

Das erste Ziel des dynamischen Stoffflussmodells ist es, die Anzahl und Gesamtmasse von Personewagen in verschiedenen Stoffflüssen und dem Fahrzeugbestand in der Schweiz detailliert zu berechnen, insbesondere wie diese Stoffflüsse sich in Zukunft entwickeln können. Am wichtigsten ist, dass das Modell in der Lage sein soll, die zukünftige Anzahl und Masse von Altfahrzeugen (Alt-Fhz) verschiedener Typen und Jahrgänge zu berechnen.

Die durch das Modell berechneten Daten zur Fahrzeugflotte ermöglichen, zusammen mit ergänzenden Daten zum Vorkommen verschiedener eingebetteter Elektrogeräten (EEG) in Fahrzeugen, auch die Stoffflüsse dieser EEG zu quantifizieren. Daten zur Zusammensetzung der EEG erlauben schlussendlich auch den Inhalt und die Stoffflüsse verschiedener Materialien oder chemischer Elemente zu berechnen.

In diesem Bericht stellen wir die Struktur des Modells, seine mathematische Umsetzung und die verschiedenen Inputdaten vor. Darüber hinaus zeigen wir, wie das Modell verwendet werden kann, um zukünftige Materialflüsse von verschiedenen EEG zu simulieren. Insbesondere wird das Modell verwendet, um den relativen Beitrag der verschiedenen Geräte zu den Stoffflüssen ausgewählter Elemente, darunter Gold, Neodym, Lanthan und Lithium, zu untersuchen.

## 2 Methodik

### 2.1 Systemdefinition

Die Systemdefinition in Abbildung 1 umfasst den Fahrzeugbestand (Prozess 1), die Verwertung von Fahrzeugen (Prozess 5), das Schreddern von Fahrzeugen (Prozess 10), die Reparatur von Fahrzeugen, d.h. den Austausch von EEG während der Fahrzeuglebensdauer (Prozess 4), sowie verschiedene Verwertungsverfahren und Zwischenmärkte. Die Fahrzeuge verlassen den Bestand über zwei mögliche Wege, hier "Unfallfahrzeuge" und "Altfahrzeuge" genannt, die zusammengefasst als "Abfluss" bezeichnet werden. Ein Teil des Abflusses wird exportiert, wozu auch der so genannte "unbekannte Verbleib") gerechnet wird. während der Rest in der Schweiz verwertet wird. Bei der Verwertung werden einige EEG aus den Alt-Fhz entfernt und können weiterverkauft werden, um bei der Fahrzeugreparatur als Ersatzteile wiederverwendet zu werden. EEG, die nicht demontiert werden, werden zusammen mit dem Rest der Fahrzeuge geschreddert. Die in geschredderten EEG enthaltenen Materialien werden auf die verschiedenen Ausgangsfraktionen des Schredders verteilt, die hier in zwei Fraktionen zusammengefasst werden: Schredderleichtfraktion und Metallfraktionen. Die Schredderleichtfraktion wird mit oder ohne Rückgewinnung von Metallen verbrannt (Verfahren 13 bzw. 14). Die Metallfraktionen aus dem Schredder gehen in Metallrecyclingprozesse (Prozess 15), wo ein Teil der Elemente zurückgewonnen wird.

Einige demontierten Geräte (aus der Reparatur oder Verwertung) können auch in das E-Schrott-Recycling-System gelangen (Verfahren 17 und 18). Änderungen der rechtlichen Vorgaben, insbesondere die Aufstellung einer Liste von sogenannte Pflichtgeräten, die zwingend demontiert werden müssen, können zu einem starken Anstieg dieses Massenstroms führen. Das Recyclingmodell wurde entwickelt, um die Auswirkungen solcher Änderungen auf die gesamten Massenströme zu testen, insbesondere auf die Menge der zurückgewonnenen Metalle.

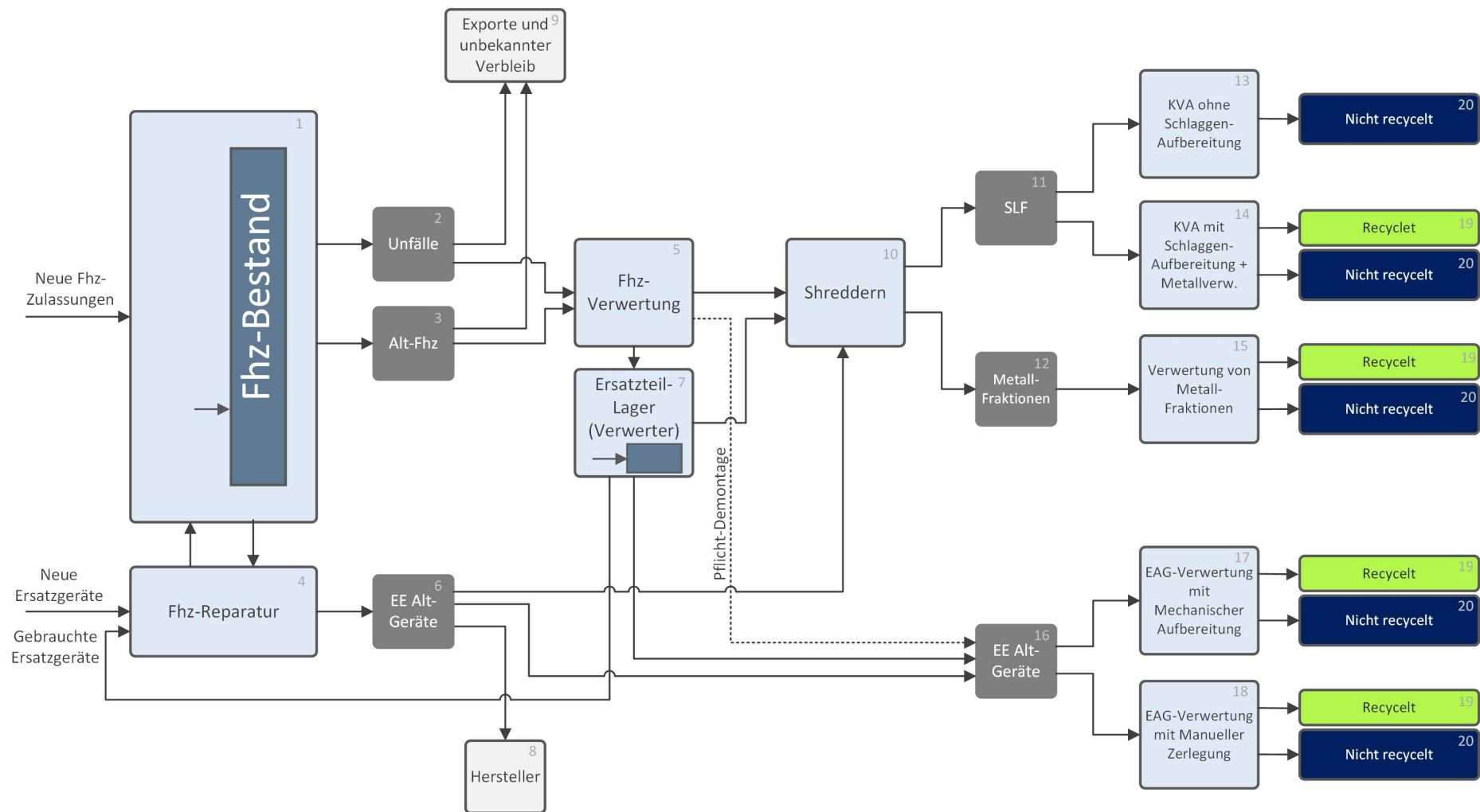


Abbildung 1 Systemdefinition.



## 2.2 Modellebenen

Das Modell ist, wie in Abbildung 2 dargestellt, in vier Ebenen aufgebaut. Zunächst werden die Anzahl und Masse der Fahrzeuge verschiedener Jahrgänge und Antriebstypen quantifiziert. Die Fahrzeugebene umfasst in Abbildung 1 nur die Prozesse 1, 2, 3, 5, 9 und 10, da im restlichen System die Massenströme keine ganzen Fahrzeuge enthalten. Die Fahrzeugebene wird unabhängig von den anderen Ebenen berechnet. Fahrzeuge sind nach den folgenden 8 Antriebstypen kategorisiert: Benzin, Diesel, Benzin HEV, Diesel HEV, Benzin PHEV, Diesel PHEV, BEV und Andere.

In der Geräteebene werden die Anzahl und Masse der verschiedenen EEG berechnet, wobei Daten über die Anzahl der Fahrzeuge (nach Antriebstyp und Jahrgang) sowie zusätzliche gerätespezifische Daten, wie z.B. die Anzahl der EEG pro Fahrzeug und die durchschnittliche Masse der EEG, verwendet werden. Derzeit enthält die in das Modell eingebundene Geräteliste 22 EEG<sup>2</sup>, die jedoch leicht erweitert werden kann, wenn die erforderlichen Daten verfügbar sind.

Die Bauteileebene wird aus den quantifizierten Massenströmen der EEG sowie den Massenanteilen der Bauteile in jedem EEG berechnet. Derzeit sind 7 Bauteiltypen im Modell enthalten: Ferritmagnete, Neodymmagnete, Leiterplatten Kategorie 1, Leiterplatten Kategorie 2, Leiterplatten Kategorie 3, NiMH-Batteriezellen und Lithium-Ionen-Batteriezellen. Wie in der Geräteebene können weitere Bauteile (oder Materialien, wie Kupferlegierungen) leicht hinzugefügt werden, wenn Daten verfügbar sind.

Die chem. Elementebene wird schliesslich auf der Grundlage der Massenströme der Bauteile sowie der Massenanteile der Elemente in den verschiedenen Bauteilen berechnet. Derzeit sind die folgenden 11 chem. Elemente enthalten: Ag, Au, Co, Dy, La, Li, Nd, Pd, Pr, Pt und Rh d.h. ausschliesslich Metalle. Die Elementebene kann im gesamten System quantifiziert werden. Weitere Elemente können durch Einbezug weiterer Daten leicht hinzugefügt werden.

Der Aufbau des Modells in Ebenen ermöglicht es, z.B. den Beitrag verschiedener Fahrzeugtypen, EEG und Bauteile zu den Stoffflüssen bestimmter Elemente zu analysieren.

---

<sup>2</sup> Basierend auf den Ergebnissen von EVA I und der Datenverfügbarkeit wurden die folgenden Geräte einbezogen: ABS-Aktuator, Airbagsteuergerät, Alternator, Elektroantriebmotor, Steuergerät Sicherungskasten, Elektrischer Servomotor, Motorsteuergerät, ESP-Aktuator, Instrumente, Spiegelmotoren, Navigationssystem, Fensterhebermotor, Kühlerlüftermotor, Sitzmotoren, Radio/CD/Tonband, Lautsprecher, Anlasser, Drosselklappenantrieb, Wischwasserpumpe, Wischermotoren, Li-Ionen Batterie, NiMH Batterie

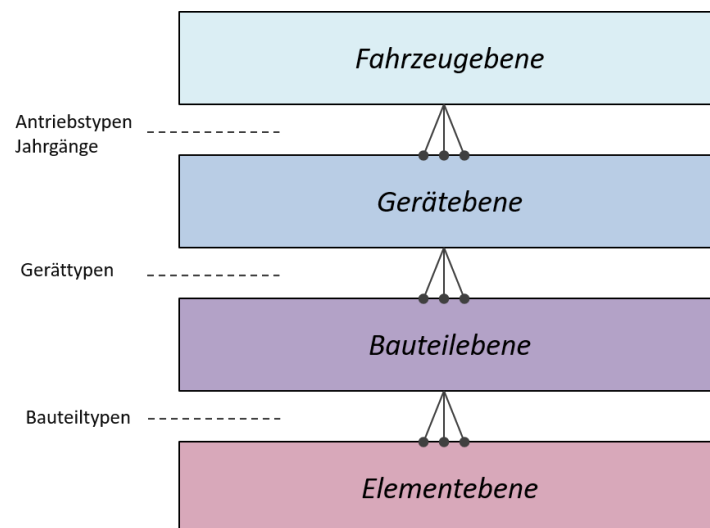


Abbildung 2 Übersicht über die verschiedenen Ebenen des Stoffflussmodells und ihre Schnittstellen.

## 2.3 Mathematisches Modell

### 2.3.1 Notation

Die folgende Notation wird verwendet, um verschiedene Arten von physikalischen Größen und Variablen im Modell zu bezeichnen.

Tabelle 1 Notation für physikalische Größen und Modellvariablen.

Symbol	Physikalische Grösse	Einheit
$N$	Anzahl (Fahrzeuge oder EEG) in einem Stofffluss oder dem Bestand	1/a or 1
$M$	Massenstrom oder Massenbestand	kg/a or kg
$m$	Durchschnittliche Masse eines Gegenstandes (z.B. Fahrzeug oder EEG)	kg
$w$	Masseanteil	kg/kg
$n$	Anteil von einer Anzahl (z.B. Anzahl eines bestimmten EEG pro Fahrzeug)	1
$k_{h-i-j}$	Transferkoeffizient: Anteil des Massenstroms von Prozess $h$ zu Prozess $i$ , der zu Prozess $j$ geht	1
$r$	Ausfallrate: Anteil der Fahrzeuge oder Geräte der während eines Jahres aus dem Bestand fließt	1

Tabelle 2 Notation für Aspekte und Dimensionen.

Symbol	Aspekt oder Dimension	Mögliche Werte
$i, j$	Prozess	$\{0, \dots, 20\}$
$t$	Zeit	$\{1950, \dots, 2060\}$
$c$	Jahrgang	$\{1950, \dots, 2060\}$
$a$	Alter; $a \equiv t - c$	$\{0, \dots, 110\}$
$v$	Fahrzeugtyp (nach Antrieb)	<i>gasoline, diesel, gasoline HEV, gasoline PHEV, diesel HEV, diesel PHEV, BEV, others</i>
$d$	Gerätetyp	<i>ABS-Aktuator, Airbagsteuergerät, Alternator, Steuergerät, Sicherungskasten, Elektrischer Servomotor, Motorsteuergerät, ESP-Aktuator, Instrumente, Spiegelmotoren, Navigationssystem, Fensterhebermotor, Kühlerlüftermotor, Sitzmotoren, Radio/CD/Tonband, Lautsprecher, Anlasser, Drosselklappenantrieb, Wischwasserpumpe, Wischermotoren, Li-Ionen Batterie, NiMH Batterie, Elektroantriebmotor mit Permanentmagnete</i>
$p$	Bauteil- oder Materialtyp	<i>Ferritmagnete, Neodymmagnete, Leiterplatten Kategorie 1, Leiterplatten Kategorie 2, Leiterplatten Kategorie 3, NiMH-Batteriezellen and Lithium-Ionen-Batteriezellen</i>
$e$	Element	<i>Ag, Au, Co, Dy, La, Li, Nd, Pd, Pr, Pt, Rh</i>

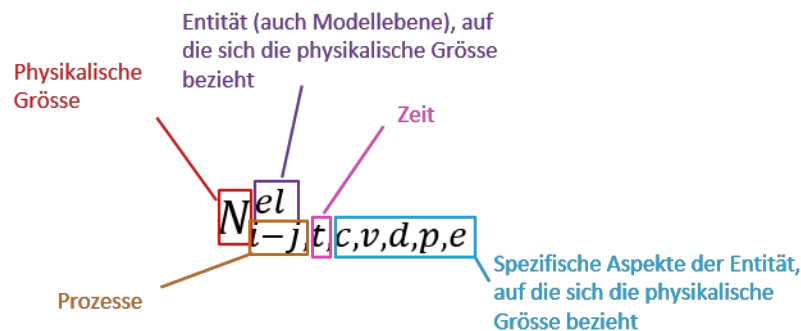


Abbildung 3 Struktur der für physikalische Größen im mathematischen Modell verwendeten Notation. Die Beispiele in Tabelle 3 veranschaulichen die Verwendung der Notation.

Tabelle 3 Beispiele für die Verwendung der Notation für Systemvariablen.

Symbol	Definition	Einheit
$N_{1-x,t,c,v}^{veh}$	Anzahl der Fahrzeuge des Fahrzeugtyps $v$ und Jahrgang $c$ im Massenstrom von Prozess 1 zu allen anderen Prozessen ( $x$ ) während Jahr $t$	1/a
$N_{5-7,t,c,d}^{dev}$	Anzahl der EEG des Gerätetyps $d$ in Fahrzeugen des Jahrgangs $c$ , die von Prozess 5 zu Prozess 7 fließen während Jahr $t$ .	1/a
$M_{S1,t,c,v,p}^{part}$	Masse der Bauteile des Bauteiltyps $p$ , in Fahrzeugen des Fahrzeugtyps $v$ und Jahrgangs $c$ , im Bestand des Prozesses 1 am Ende des Jahres $t$	kg
$M_{14-20,t,e}^{el}$	Masse des Elements $e$ , die von Prozess 14 zu Prozess 20 fließt während Jahr $t$	kg/a

### 2.3.2 Definitionen der exogenen Variablen

In dem Modell wird eine Reihe von exogenen Variablen verwendet, die direkt anhand von Daten (z.B. aus Statistiken) quantifiziert werden können oder die in Szenarien definiert werden. Die Parameter sind aufgelistet und beschrieben in Tabelle 4.

Tabelle 4 Exogene Variablen (Inputdaten).

	Parameter	Description	Unit
Fahrzeugebene	$N_{S1,t}^{veh}$	Gesamtzahl der Fahrzeuge im Bestand am Ende des Jahres $t$	1
	$r_{S1-2,v,a}$	Unfallausfallrate: Ausfallrate von Fahrzeugen, die dem Bestand durch Unfälle verlassen, in Abhängigkeit von Fahrzeugtyp $v$ und Alter $a$	1
	$r_{S1-3,v,a}$	Nicht-Unfallausfallrate: Ausfallrate für Fahrzeuge, die dem Bestand aus anderen Gründen als Unfälle verlassen, in Abhängigkeit von Fahrzeugtyp $v$ und Alter $a$	1
	$x_{c,v}$	Typenaufteilung: Anteil der Neuzulassungen im Jahr $c$ , die dem Fahrzeugtyp $v$ angehören	1
	$k_{1-2-9,t}$	Anteil der Unfallfahrzeuge, der exportiert wird (inklusive unbekannter Verbleib), in Abhängigkeit von der Zeit, $t$	1
	$k_{1-3-9,t}$	Anteil der Altfahrzeuge (nicht-Unfälle), der exportiert wird (inklusive unbekannter Verbleib), in Abhängigkeit von der Zeit	1
	$m_{c,v}$	Durchschnittliche Masse der Fahrzeuge des Jahrgangs $c$ und des Typs $v$	kg
Geräteebene	$n_{c,v,d}$	Durchschnittliche Anzahl von EEG des Typs $d$ pro Fahrzeug des Jahrgangs $c$ und des Typs $v$	1
	$m_{c,v,d}$	Durchschnittliche Masse des EEG des Typs $d$ in Fahrzeugen des Jahrgangs $c$ und des Typs $v$	kg
	$r_{S1-4,a,d}^{dev}$	Reparaturausfallsrate von EEG des Typs $d$ in Abhängigkeit vom Fahrzeugalter $a$	1
	$k_{x-5-7,t,d}^{dev}$	Anteil der EEG des Typs $d$ , der während des Jahres $t$ für Wiederverwendung demontiert werden	1
	$k_{x-5-10,t,d}^{dev}$	Anteil der EEG des Typs $d$ , der während des Jahres $t$ zusammen mit Fahrzeugen geschreddert wird	1
	$k_{x-5-16,t,d}^{dev}$	Anteil der EEG des Typs $d$ , der während des Jahres $t$ für Recycling demontiert wird	1
	$k_{5-7-4,t}^{dev}$	Anteil der für Wiederverwendung demontierten EEG, der während des Jahres $t$ tatsächlich wiederverwendet werden	1
	$k_{5-7-10,t}^{dev}$	Anteil der für Wiederverwendung demontierten EEG, der stattdessen im Laufe des Jahres $t$ geschreddert wird	1
	$k_{5-7-16,t}^{dev}$	Anteil der für Wiederverwendung demontierten EEG, der stattdessen im Laufe des Jahres $t$ dem Elektronik-Recycling zugeführt wird	1
	$k_{4-6-16,t}^{dev}$	Anteil der defekten EEG aus Werkstätten, der während des Jahres $t$ dem Elektronik-Recycling zugeführt werden	1
Bauteilebene	$k_{x-16-17,t}^{dev}$	Anteil der Geräte aus dem Elektronik-Recycling, der im Jahr $t$ einer mechanischen Vorbehandlung zugeführt wird	1
	$w_{c,d,p}$	Durchschnittlicher Massenanteil eines Bauteils des Typs $p$ in einem EEG des Typs $d$ und des Jahrgangs $c$	1
	$k_{x-10-12,p}^{part}$	Anteil des Massenstroms von Bauteilen des Typs $p$ , der nach dem Schreddern in Metallfraktionen landen	1
	$k_{16-17-19,p}^{part}$	Anteil der Masse eines Bauteils des Typs $p$ , der metallurgischen Prozessen zugeführt wird, nachdem er eine mechanische Vorbehandlung von Elektronik-Abfall durchlaufen hat	1
Elementebene	$k_{16-18-19,p}^{part}$	Anteil der Masse eines Bauteils des Typs $p$ , der metallurgischen Prozessen zugeführt wird, nachdem er eine manuelle Vorbehandlung von Elektroschrott durchlaufen hat	1
	$k_{10-11-14,t}$	Anteil des Massenstroms der Schredderleichtfraktion, der mit Schlackenaufbereitung und Metallrückgewinnung während des Jahres $t$ verbrannt wird	1
	$w_{p,e}$	Durchschnittlicher Massenanteil des Elements $e$ in einem Bauteil des Typs $p$	1
	$k_{11-14-19,e}$	Anteil der Masse des Elements $e$ , der Recycelt wird von Verbrennungsanlagen mit Schlackenaufbereitung	1
	$k_{12-15-19,e}$	Anteil der Masse des Elements $e$ in Metallfraktionen aus dem Schredder, die durch metallurgische Prozesse zurückgewonnen wird	1
	$k_{16-17-19,e}^{el}$	Zurückgewonnener Anteil der Masse des Elements $e$ , der in metallurgische Prozesse eintritt, nachdem er eine mechanische Vorbehandlung von E-Abfall durchlaufen hat	1
	$k_{16-18-19,e}^{el}$	Zurückgewonnener Anteil der Masse des Elements $E$ , der in metallurgische Prozesse eintritt, nachdem er eine manuelle Vorbehandlung von E-Abfall durchlaufen hat	1

### 2.3.3 Modellgleichungen

Alle Gleichungen sind in der Reihenfolge ihrer Berechnung in den folgenden vier Tabellen aufgeführt, gefolgt von einer Zusammenfassung der wichtigsten Berechnungsschritte. Die Indexzahlen in Klammern verweisen auf die entsprechenden Gleichungen.

#### Fahrzeugebene

Ausgangspunkt ist die zeitabhängige Gesamtzahl der Fahrzeuge im Bestand. Diese wird als eine exogene Variable behandelt, die das System steuert. Die Grösse aller Massenströme in allen Ebenen wird letztlich durch diesen Bestand bestimmt. Die Abflüsse aus dem Fahrzeugbestand werden auf der Grundlage von Ausfallraten berechnet, die vom Alter der Fahrzeuge abhängen (1, 2). Sobald die Abflüsse eines bestimmten Jahres berechnet sind, kann der erforderliche Zufluss (Neuzulassungen) zur Deckung der Bestandsänderung durch eine Massenbilanz berechnet werden (6). Dieser Zufluss wird dann unter Verwendung zeitabhängiger Marktanteile auf die verschiedenen Antriebstypen verteilt (7). Dies wiederum ermöglicht die Quantifizierung der Fahrzeuge verschiedener Antriebstypen und Jahrgänge durch den Fahrzeugbestand (8). Die Anzahl der exportierten und demontierten Fahrzeuge wird mit zeitabhängigen Transferkoeffizienten berechnet (9, 10, 11, 12). Die Anzahl in der Schweiz geschredderten Fahrzeuge wird als Summe der Verwerteten Fahrzeuge berechnet (13). Schliesslich werden die Massenströme der Fahrzeuge aus der durchschnittlichen Fahrzeugmasse nach Antriebstyp und Jahrgang berechnet (17). Die detaillierten Ergebnisse (Antriebstyp- und Jahrgangabhängig) können aggregiert werden (14, 15, 16).

Tabelle 5 Variablen in der Fahrzeugebene und Gleichungen zu deren Berechnung.

Beschreibung der Variable	Gleichung
Fahrzeuge, die durch Unfälle den Bestand verlassen	$N_{1-2,t,c,v}^{veh} = N_{S1,t-1,c,v}^{veh} r_{S1-2,v,a} \quad t > c \quad (1)$
Fahrzeuge, die durch Alterungsprozess den Bestand verlassen (einschliesslich Exporte aus zweiter Hand)	$N_{1-3,t,c,v}^{veh} = N_{S1,t-1,c,v}^{veh} r_{S1-3,v,a} \quad t > c \quad (2)$
	$N_{1-x,t,c,v}^{veh} = N_{1-2,t,c,v}^{veh} + N_{1-3,t,c,v}^{veh} \quad (3)$
Gesamtzahl der Fahrzeugabfluss aus dem Bestand	$N_{1-x,t}^{veh} = \sum_c \sum_v N_{1-x,t,c,v}^{veh} \quad (4)$
Bestandsänderung von Fahrzeugen	$N_{dS1,t}^{veh} = N_{S1,t}^{veh} - N_{S1,t-1}^{veh} \quad (5)$
Neuzulassungen von Fahrzeugen	$N_{0-1,t}^{veh} = N_{1-x,t}^{veh} + N_{dS,t}^{veh} \quad (6)$
Neuzulassungen von Fahrzeugen, nach Fahrzeugtyp	$N_{0-1,t,c=t,v}^{veh} = N_{0-1,t}^{veh} x_{c=t,v} \quad (7)$
Bestand der Fahrzeuge, nach Jahrgang und Antriebstyp	$N_{S1,t,c,v}^{veh} = N_{0-1,t'=c,c,v}^{veh} - \sum_{t'=c}^t N_{1-x,t',c,v}^{veh} \quad t \geq c \quad (8)$
Exportierte Unfallfahrzeuge	$N_{2-9,t,c,v}^{veh} = N_{1-2,t,c,v}^{veh} k_{1-2-9,t} \quad (9)$
Exportierte Nicht-Unfallfahrzeuge	$N_{3-9,t,c,v}^{veh} = N_{1-3,t,c,v}^{veh} k_{1-3-9,t} \quad (10)$
In der Schweiz verwertete Unfallfahrzeuge	$N_{2-5,t,c,v}^{veh} = N_{1-2,t,c,v}^{veh} (1 - k_{1-2-9,t}) \quad (11)$

Beschreibung der Variable	Gleichung	
In der Schweiz verwertete Nicht-Unfallfahrzeuge	$N_{3-5,t,c,v}^{veh} = N_{1-3,t,c,v}^{veh} (1 - k_{1-3-9,t})$	(12)
Geschredderte Fahrzeuge	$N_{5-6,t,c,v}^{veh} = N_{2-5,t,c,v}^{veh} + N_{3-5,t,c,v}^{veh}$	(13)
Gesamtzahl der Fahrzeuge, die während des Jahres $t$ von Prozess $i$ zu Prozess $j$ fließen	$N_{i-j,t}^{veh} = \sum_c \sum_v N_{i-j,t,c,v}^{veh}$	$i-j \in \left\{ \begin{matrix} 0-1,1-2,1-3,2-9, \\ 3-9,2-5,3-5,5-10 \end{matrix} \right\}$ (14)
Gesamtzahl der Fahrzeuge des Jahrgangs $c$ , die während des Jahres $t$ von Prozess $i$ zu Prozess $j$ fließen	$N_{i-j,t,c}^{veh} = \sum_v N_{i-j,t,c,v}^{veh}$	$i-j \in \left\{ \begin{matrix} 0-1,1-2,1-3,2-9, \\ 3-9,2-5,3-5,5-10 \end{matrix} \right\}$ (15)
Gesamtzahl der Fahrzeuge des Typs $v$ , die während des Jahres $t$ von Prozess $i$ zu Prozess $j$ fließen	$N_{i-j,t,v}^{veh} = \sum_c N_{i-j,t,c,v}^{veh}$	$i-j \in \left\{ \begin{matrix} 0-1,1-2,1-3,2-9, \\ 3-9,2-5,3-5,5-10 \end{matrix} \right\}$ (16)
Massenstrom von Fahrzeugen von Prozess $i$ zu Prozess $j$	$M_{i-j,t,c,v}^{veh} = N_{i-j,t,c,v}^{veh} m_{c,v}^{veh}$	$i-j \in \left\{ \begin{matrix} 0-1,1-2,1-3,2-9, \\ 3-9,2-5,3-5 \end{matrix} \right\}$ (17)
Masse des Fahrzeugbestandes	$M_{S1,t,c,v}^{veh} = N_{S1,t,c,v}^{veh} m_{c,v}^{veh}$	(18)

## Geräteebene

Für alle in der Fahrzeugebene quantifizierten Massenströme wird die Anzahl der EEG berechnet, indem die Anzahl der Fahrzeuge (nach Jahrgang und Antriebstyp) mit der Jahrgang- und Antriebstypabhängigen Anzahl der EEG pro Fahrzeug (19, 20) multipliziert wird. Die Anzahl der EEG, die den Bestand durch Reparatur verlassen, wird unter Verwendung einer Jahrgang- und Antriebstypabhängigen Ausfallrate für jedes EEG berechnet (24, 25). Es ist jedoch zu beachten, dass der Gerätestrom durch die Reparatur derzeit weitgehend unbekannt ist und die Ergebnisse in diesem Teil des Systems in diesem Bericht nicht dargestellt werden. Die Anzahl der demontierten Geräte sowie die Anzahl der Geräte, die an verschiedene Recycling-/Wiederverwendungsziele gehen, werden mit Hilfe von Transferkoeffizienten berechnet, die zeitabhängig sein können (21-23, 27-29, 31-35). Für alle Geräteströme wird der Massenstrom aus der Anzahl der EEG (nach Jahrgang und Antriebstyp) und der Jahrgang- und Antriebstypabhängigen Durchschnittsmasse jedes EEGs berechnet (36).

Tabelle 6 Variablen in der Geräteebene und Gleichungen zu deren Berechnung.

Beschreibung der Variable	Gleichung	
Anzahl der EEG, die von Prozess $i$ zu Prozess $j$ gehen	$N_{i-j,t,c,v,d}^{dev} = N_{i-j,t,c,v}^{veh} n_{c,v,d}$	$i-j \in \left\{ \begin{matrix} 0-1,1-2,1-3,2-9, \\ 3-9,2-5,3-5 \end{matrix} \right\}$ (19)
Anzahl der EEG im Bestand	$N_{S1,t,c,v,d}^{dev} = N_{S1,t,c,v}^{veh} n_{c,v,d}$	(20)
Für Wiederverwendung demontierte Geräte	$N_{5-7,t,c,d}^{dev} = (N_{2-5,t,c,d}^{dev} + N_{3-5,t,c,d}^{dev}) k_{x-5-7,t,d}^{dev}$	(21)
In Fahrzeugen zum Schreddern verbleibende EEG	$N_{5-10,t,c,d}^{dev} = (N_{2-5,t,c,d}^{dev} + N_{3-5,t,c,d}^{dev}) k_{x-5-10,t,d}^{dev}$	(22)
Geräte, die für Recycling über Elektro-Abfall-Route demontiert werden	$N_{5-16,t,c,d}^{dev} = (N_{2-5,t,c,d}^{dev} + N_{3-5,t,c,d}^{dev}) k_{x-5-16,t,d}^{dev}$	(23)
Geräte, die während der Lebensdauer des Fahrzeuges ausfallen und in Garagen demontiert werden	$N_{1-4,t=c,c,v,d}^{dev} = N_{S1,t,c,v,d}^{dev} r_{S1-4,a=0,d}^{dev}$	$t = c$ (24)
	$N_{1-4,t>c,c,v,d}^{dev} = N_{S1,t-1,c,v,d}^{dev} r_{S1-4,a,d}^{dev}$	$t > c$ (25)



Beschreibung der Variable	Gleichung	
Geräte, die in den Bestand aufgenommen werden, um ausgefallene Geräte zu ersetzen	$N_{4-1,t,c,v,d}^{dev} = N_{1-4,t,c,v,d}^{dev}$	(26)
Demontierte Geräte, die von Verwertern in Werkstätten gehen, um ausgefallene Geräte zu ersetzen	$N_{7-4,t,c,v,d}^{dev} = N_{5-7,t,c,v,d}^{dev} k_{5-7-4,t}^{dev}$	(27)
Demontierte Geräte, die zum Autoschreddern gehen	$N_{7-10,t,c,v,d}^{dev} = N_{5-7,t,c,v,d}^{dev} k_{5-7-10,t}^{dev}$	(28)
Demontierte Geräte, die in ein Elektroabfall-Recycling-System gelangen	$N_{7-16,t,c,v,d}^{dev} = N_{5-7,t,c,v,d}^{dev} k_{5-7-16,t}^{dev}$	(29)
Ausgefallene Geräte, die Garagen verlassen	$N_{4-6,t,c,v,d}^{dev} = N_{1-4,t,c,v,d}^{dev}$	(30)
Ausgefallene Geräte, die von der Werkstatt zum Elektronik-Recycling gehen	$N_{6-16,t,c,v,d}^{dev} = N_{4-6,t,c,v,d}^{dev} k_{4-6-16,t}^{dev}$	(31)
Ausgefallene Geräte, die von den Werkstätten zurück zum Hersteller gehen	$N_{6-8,t,c,v,d}^{dev} = N_{4-6,t,c,v,d}^{dev} (1 - k_{4-6-16,t}^{dev})$	(32)
Neue Geräte, die ausgefallene Geräte ersetzen	$N_{0-4,t,c,v,d}^{dev} = N_{4-6,t,c,v,d}^{dev} - N_{7-4,t,c,v,d}^{dev}$	(33)
Geräte, die in ein Elektroabfall-Recycling-System mit mechanischer Vorbehandlung gehen	$N_{16-17,t,c,v,d}^{dev} = (N_{5-16,t,c,v,d}^{dev} + N_{6-16,t,c,v,d}^{dev} + N_{7-16,t,c,v,d}^{dev}) k_{x-16-17,t}^{dev}$	(34)
Geräte, die in ein Elektroabfall-Recycling-System mit manueller Vorbehandlung gelangen	$N_{16-18,t,c,v,d}^{dev} = (N_{5-16,t,c,v,d}^{dev} + N_{6-16,t,c,v,d}^{dev} + N_{7-16,t,c,v,d}^{dev}) (1 - k_{x-16-17,t}^{dev})$	(35)
Massenstrom von Geräten, von Prozess i zu Prozess j	$M_{i-j,t,c,v,d}^{dev} = N_{i-j,t,c,v,d}^{dev} m_{c,v,d}^{dev}$	$i-j \in \left\{ \begin{array}{l} 0-1,1-2,1-3,2-9, \\ 3-9,2-5,3-5,5-10, \\ 5-7,5-16,7-4,7-16, \\ 1-4,4-1,0-4,4-6,6-8, \\ 6-16 \end{array} \right\}$ (36)

## Bauteilebene

Die Massenströme der in der EEG enthaltenen Bauteile werden aus den Massenströmen der Geräte und dem Massenanteil der Bauteile in den verschiedenen EEG berechnet (37). Die Massenströme von Bauteilen, die nach dem Schreddern in die Schredderleichtfraktion und in Metallfraktionen gelangen, werden mit Hilfe von Transferkoeffizienten berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese im Laufe der Zeit nicht ändern.

Tabelle 7 Variablen in der Bauteilebene und Gleichungen zu deren Berechnung.

Beschreibung der Variable	Gleichung	
Massenstrom von Bauteile des Typs $p$ von Prozess $i$ zu Prozess $j$	$M_{i-j,t,c,d,p}^{part} = M_{i-j,t,c,d}^{dev} w_{c,d,p}$	(37)
	$M_{i-j,t,p}^{part} = \sum_d \sum_c M_{i-j,t,c,d,p}^{part}$	(38)
Bauteile, die nach dem Autoschredder in Metallfraktionen gehen	$M_{10-12,t,p}^{part} = (M_{5-10,t,p}^{part} + M_{7-10,t,p}^{part}) k_{x-10-12,p}^{part}$	(39)
Bauteile, die nach dem Autoschredder in die Schredderleichtfraktion gehen	$M_{10-11,t,p}^{part} = (M_{5-10,t,p}^{part} + M_{7-10,t,p}^{part}) (1 - k_{x-10-12,p}^{part})$	(40)

## Elementebene

Bei allen Massenströmen, für die die Bauteilebene bestimmt ist, wird die Elementmasse anhand der Bauteilmasse und des Massenanteils der verschiedenen Elemente in den verschiedenen Bauteilen berechnet (41). Die zurückgewonnene Elementmasse in den verschiedenen Recyclinggruppen wird unter Verwendung von Transferkoeffizienten berechnet, die zeitabhängig sein können (43-56).

Tabelle 8 Variablen in der Elementebene und Gleichungen zu deren Berechnung.

Beschreibung der Variable	Gleichung
Massenstrom des Elements $e$ von Prozess $i$ zu Prozess $j$	$M_{i-j,t,d,p,e}^{el} = M_{i-j,t,c,d,p}^{part} w_{p,e}$ (41)
Elemente der Shredderleichtfraktion	$M_{10-11,t,e}^{el} = \sum_p (M_{10-11,t,p}^{part} w_{p,e})$ (42)
Elemente in Schredderleichtfraktion, die zu Verbrennungsanlage mit Rückgewinnung von Metallen geht	$M_{11-14,t,e}^{el} = M_{10-11,t,e}^{el} k_{10-11-14,t}$ (43)
Elemente in Schredderleichtfraktion, die zu Verbrennungsanlage ohne Rückgewinnung von Metallen geht	$M_{11-13,t,e}^{el} = M_{10-11,t,e}^{el} (1 - k_{10-11-14,t})$ (44)
Elemente in Metallfraktionen, die metallurgischen Prozessen zugeführt werden	$M_{12-15,t,e}^{el} = M_{10-12,t,e}^{el}$ (45)
Elemente im Output von Verbrennungsanlage ohne Metallrückgewinnung	$M_{13-20,t,e}^{el} = M_{11-13,t,e}^{el}$ (46)
Nach Verbrennung zurückgewonnene Elemente	$M_{14-19,t,e}^{el} = M_{11-14,t,e}^{el} k_{11-14-19,e}$ (47)
Aus Schreddermetallfraktionen zurückgewonnene Elemente	$M_{15-19,t,e}^{el} = M_{12-15,t,e}^{el} k_{12-15-19,e}$ (48)
Nach Elektroabfall-Recycling mit mechanischer Vorbehandlung zurückgewonnene Elemente	$M_{17-19,t,e}^{el} = \sum_p (M_{16-17,t,p}^{part} k_{16-17-19,p}^{part} w_{p,e} k_{16-17-19,e}^{el})$ (49)
Nach Elektroabfall-Recycling mit manueller Vorbehandlung zurückgewonnene Elemente	$M_{18-19,t,e}^{el} = \sum_p (M_{16-18,t,p}^{part} k_{16-18-19,p}^{part} w_{p,e} k_{16-18-19,e}^{el})$ (50)
Nicht rückgewonnene Elemente nach Verbrennungsanlage mit Metallrückgewinnung	$M_{14-20,t,e}^{el} = M_{11-14,t,e}^{el} (1 - k_{11-14-19,e})$ (51)
Aus der Shreddermetallfraktion nicht zurückgewonnene Elemente	$M_{15-20,t,e}^{el} = M_{12-15,t,e}^{el} (1 - k_{12-15-19,e})$ (52)
Nach Elektroabfall-Recycling mit mechanischer Vorbehandlung nicht zurückgewonnene Elemente	$M_{17-20,t,e}^{el} = M_{16-17,t,e}^{el} - M_{17-19,t,e}^{el}$ (53)
Nach Elektroabfall-Recycling mit manueller Vorverarbeitung nicht zurückgewonnene Elemente	$M_{18-20,t,e}^{el} = M_{16-18,t,e}^{el} - M_{18-19,t,e}^{el}$ (54)
Gesamtmasse des zurückgewonnenen Elements $e$	$M_{x-19,t,e}^{el} = \sum_{i=14,15,17,18} M_{i-19,t,e}^{el}$ (55)
Gesamtmasse des nicht zurückgewonnenen Elements $e$	$M_{x-20,t,e}^{el} = \sum_{i=13,14,15,17,18} M_{i-20,t,e}^{el}$ (56)

## 2.4 Daten und Annahmen zur Quantifizierung von exogenen Variablen

Im Folgenden werden Daten und Annahmen für die wichtigsten exogenen Variablen vorgestellt. Dazu gehören sowohl historische Daten als auch die Definition eines Zukunftsszenarios. Das Hauptmerkmal dieses Szenarios ist ein rasches Wachstum des Elektro- und Hybrid-Elektrofahrzeugbestandes. Bei einigen Gerätetypen wird davon ausgegangen, dass sich die Anzahl der Geräte pro Fahrzeug entsprechend einer Fortsetzung der aktuellen Trends verändern wird. Dazu gehört z.B. der Ersatz des ABS-Aktuators durch den weiterentwickelten ESP-Aktuator. Bei den meisten anderen Parametern, z.B. dem Anteil der exportierten Alt- und Unfallsfahrzeuge, wird angenommen, dass sie auf dem derzeitigen Niveau bleiben.

### 2.4.1 Fahrzeugbestand

Daten über die Anzahl Fahrzeuge im Bestand bis 2018 wurden vom Bundesamt für Statistik erhoben.<sup>1</sup> Im Projekt EVA I wurde ein Szenario definiert, das auf Prognosen für die Bevölkerung und die Anzahl Personenwagen pro Kopf im Bestand basiert.<sup>2</sup> Wir verwenden hier das gleiche Szenario. Das Szenario stellt eine nahezu lineare Fortsetzung des aktuellen Bestandwachstums dar.

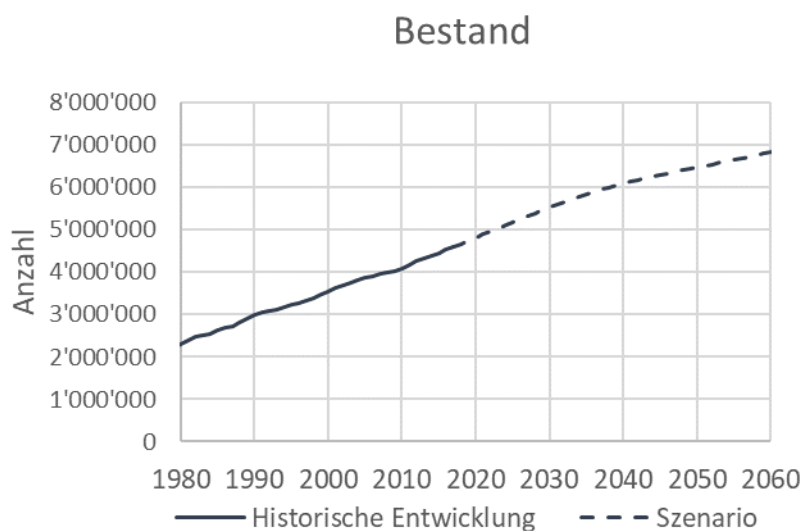


Abbildung 4. Bestand der Personenwagen in der Schweiz nach BFS (historische Entwicklung) und Szenario bis 2060, aus dem Projekt EVA I.<sup>2</sup>

### 2.4.2 Ausfallraten der Fahrzeuge

Die Ausfallraten  $r_{S1-2,a}$  und  $r_{S1-3,a}$  wurden mit Daten der Stiftung Autorecycling Schweiz (SARS) über geschredderte Fahrzeuge im Zeitraum 2008-2018<sup>3</sup>, detaillierten Daten über den Bestand (nach Jahrgang) für den Zeitraum 2010-2018<sup>4-6</sup> und Modellergebnissen aus dem EVA-I-Projekt berechnet.<sup>2</sup>

Die Unfallausfallrate wurde als unabhängig vom Fahrzeugalter angenommen. Sie wurde von der durchschnittlichen Ausfallrate für Fahrzeuge im Alter von 0 bis 8 Jahren in den Jahren 2010-2018

berechnet und um den Anteil der permanent abgemeldeten Fahrzeuge korrigiert, die exportiert wurden oder aus anderen Gründen nicht in der Schweiz geschreddert wurden (unbekannter Verbleib). Die daraus resultierende Unfallausfallrate ist in Abbildung 6 als rote Linie dargestellt.

Der restliche Anteil der gesamte Ausfallrate wurde als Ausfallrate der Weibull-Verteilung (blau gestrichelte Linie in Abbildung 5) abzüglich der Unfallausfallrate berechnet. Da dies für die ersten 6 Jahre zu negativen Werten führen würde, wurde sie in diesen Jahren auf 0 gesetzt. Die sich daraus ergebende Nicht-Unfallausfallrate ist in Abbildung 6 als blaue Linie dargestellt.

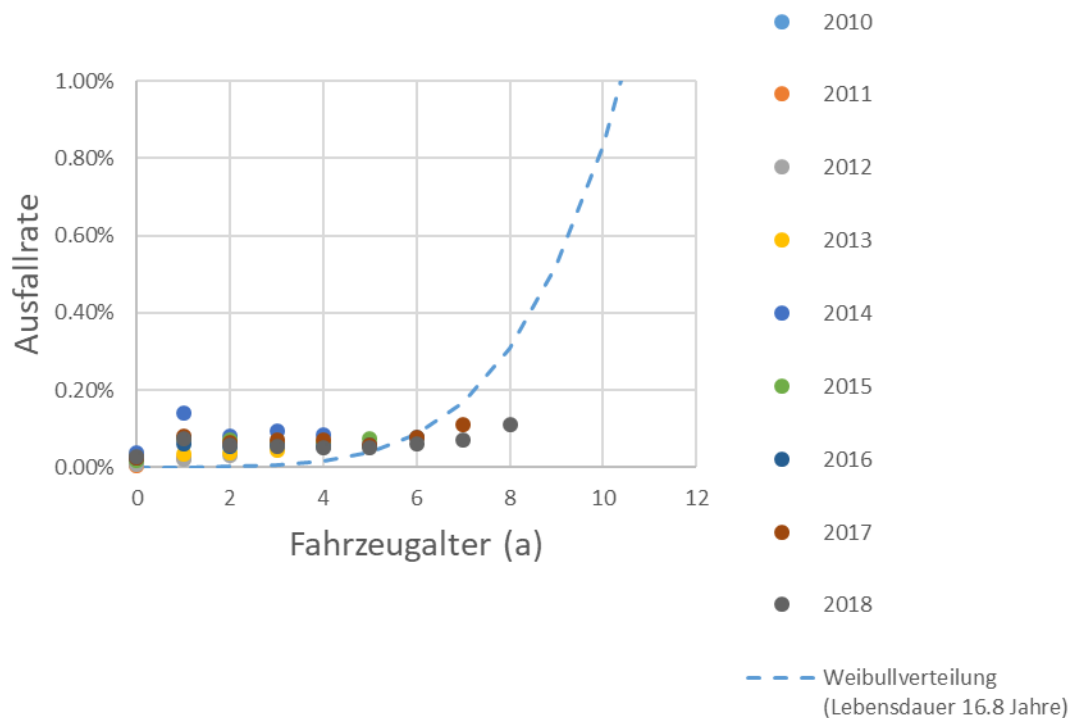


Abbildung 5 Ausfallraten. Vergleich zwischen Statistiken (Punkte) und die Ausfallrate der Weibullverteilung.

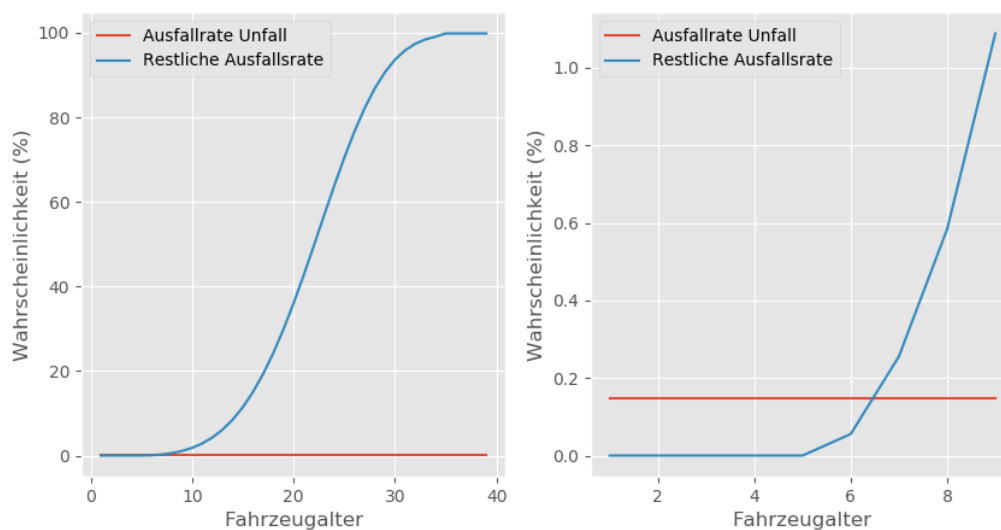


Abbildung 6 Berechnete Ausfallraten, die als Inputdaten benutzt wurden. Links: Bis 40 Jahre Fahrzeugalter. Rechts: Die ersten 9 Jahre herangezogen.

### 2.4.3 Marktanteile der Antriebstypen

Im Stoffflussmodell sind Personenwagen nach 8 verschiedene Antriebstypen differenziert: Es gibt keine Datenquelle, die die gleiche Aufteilung benutzt. Deswegen wurden für die Berechnung der Marktanteile verschiedene Datenquellen benutzt. Die wichtigste Quelle ist die Statistik der Neuzulassungen von BFS.<sup>7</sup> Diese Statistik unterscheidet jedoch nicht zwischen Plug-in-Hybriden und anderen Hybriden. Der Anteil Plug-in-Hybride wurde mit Daten von Auto-Schweiz<sup>8</sup> und European Alternative Fuels Observatory (EAFO)<sup>9</sup> berechnet.

Auto-Schweiz veröffentlicht auf ihrer Webseite einige Daten zum Marktanteil verschiedener Fahrzeuge mit modernem Antrieb.<sup>8</sup> Sie unterscheiden zwischen vollelektrisch (BEV), hybrid (HEV), plug-in hybrid (PHEV), brennstoffzellen-elektrisch (FCEV), komprimiertem Erdgas (CNG) und anderen.

European Alternative Fuels Observatory (EAFO) veröffentlicht Daten über die Anzahl der Neuzulassungen von BEV, PHEV, CNG, LPG und FCEV.<sup>9</sup> Die EAFO bezieht HEVs nicht in ihre Statistik ein. Daten über Neuzulassungen in der Schweiz sind von 2008 bis 2019 verfügbar.

Die Datenbank der Vereinten Nationen über den internationalen Handel, UN Comtrade,<sup>10</sup> enthält jährliche Daten über die Anzahl der in die Schweiz importierten Personenwagen. Da in der Schweiz keine Personenwagen hergestellt werden, kommen diese Daten der Zahl der Neuzulassungen recht nahe und lassen auch Rückschlüsse auf die Marktanteile der verschiedenen Antriebstypen zu. Die 2017 von Comtrade verwendete Revision der HS-Klassifikation beinhaltet unter anderem eine Unterscheidung zwischen BEV, Benzin-HEV, Benzin-PHEV, Diesel-HEV und Diesel-PHEV. In dieser Klassifikation stehen Daten aus den Jahren 2017, 2018 und 2019 zur Verfügung. UN Comtrade enthält auch den angegebenen Geldwert der Fahrzeuge und ihre Gesamtmasse.

Die Marktanteile der ausgewählten Antriebstypen wurden auf folgende Weise berechnet:

- Die Marktanteile von Benzin, Diesel, BEV und anderen wurden direkt aus den BFS-Statistiken über Neuregistrierungen für den Zeitraum 2005-2018 berechnet.
- Die Marktanteile von Benzinhybriden (einschliesslich HEV und PHEV) und Dieselhybriden (einschliesslich HEV und PHEV) wurden für den Zeitraum 2005-2018 direkt aus den BFS-Statistiken ermittelt. Der Gesamtmarktanteil von PHEV wurde mit Daten der EAFO für 2009-2018 berechnet (vor 2012 war er jedoch 0). Daraus wurde der Anteil von PHEV an allen Hybriden für den Zeitraum 2005-2018 berechnet. Der Anteil von PHEV unter den Hybriden war vor 2012 0 und stieg schrittweise auf etwa 30% im Jahr 2018. Es wurde dann angenommen, dass der Anteil der PHEV unter den Hybriden bei Benzinhybriden und Dieselhybriden gleich hoch ist.
- Für 2019 wurden die Daten von AutoSchweiz für den Anteil von BEV, Benzin-HEV, Diesel-HEV, Benzin-PHEV und Diesel-PHEV verwendet. Für die übrigen Fahrzeugtypen wurde angenommen, dass sie den gleichen relativen Anteil des nichtelektrischen Anteils an den Neuzulassungen haben wie 2018.

Für die Zukunft (ab 2020) wurde ein Szenario für die Marktanteile der verschiedenen Antriebstypen definiert. Das Szenario beinhaltet ein rasches kontinuierliches Wachstum der modernen Antriebstypen und erreicht das "10/20"-Ziel von AutoSchweiz (PHEV + BEV  $\geq 10\%$  im Jahr 2020). Es geht davon aus, dass der Marktanteil der BEV im Jahr 2040 80% erreicht und weiterhin asymptotisch gegen 90% wächst. In der Zwischenzeit nähern sich HEV und PHEV jeweils 50% der verbleibenden (Nicht-BEV-)Fahrzeuge an, wobei die HEV anfangs schneller wachsen. Dies führt zu einem dauerhaften Rückgang der reinen Verbrennungsmotor-Fahrzeuge.

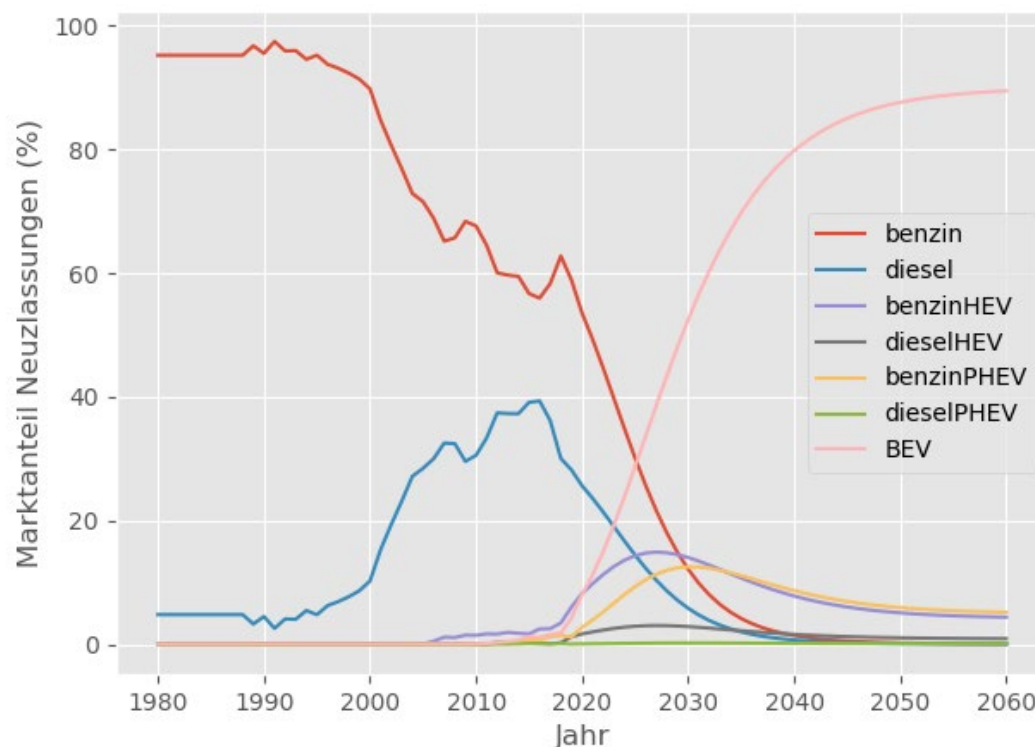


Abbildung 7 Marktanteile der Antriebstypen. Von 1988 bis 2019: von Statistiken. Ab 2020: Szenario.

#### 2.4.4 Anteil Export und unbekannter Verbleib der Annullierten Fahrzeuge

Ein erheblicher Teil der annullierten Fahrzeuge (Abfluss) wird exportiert oder werden auf andere Weise nicht in der Schweiz verwertet oder geschreddert (unbekannter Verbleib). Im Modell wird kein Unterschied zwischen Exporten und unbekanntem Verbleib gemacht. Der Anteil der Exporte plus unbekannter Verbleib von Altfahrzeugen wurde anhand von Statistiken über die Zahl der in der Schweiz geschredderten Fahrzeuge und die Zahl der annullierten Fahrzeuge, die aus SARS gewonnen wurden,<sup>3</sup> berechnet. Der Anteil der Exporte und des unbekannten Verbleibs stieg von 2002 (rund 30%) bis 2008 (fast 80%) drastisch an. Im Zukunftsszenario (ab 2020) wird angenommen, dass er konstant auf dem Durchschnitt der letzten 5 Jahre bleibt.



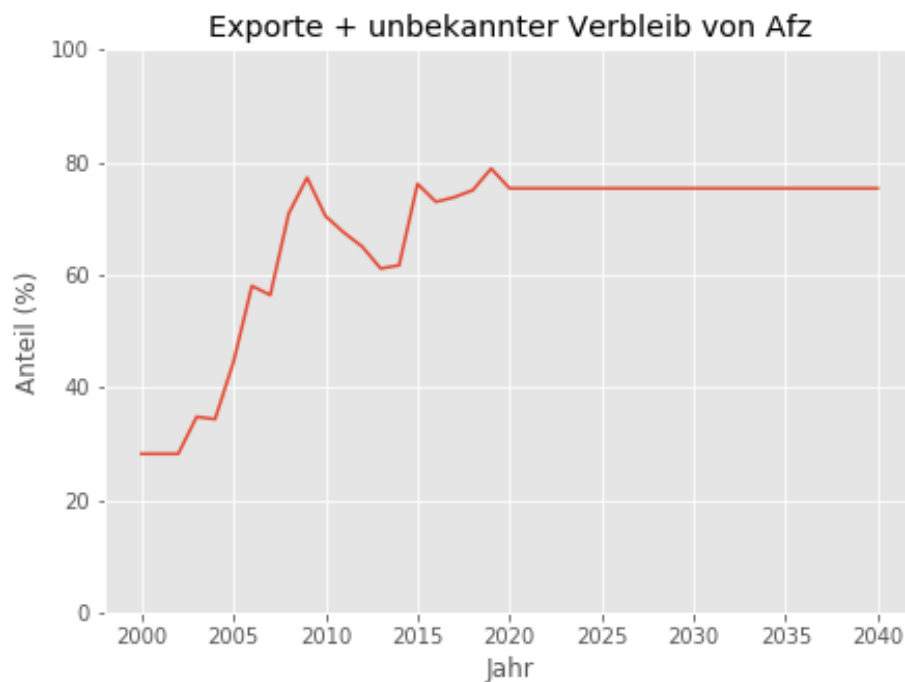


Abbildung 8 Anteil Exporte + unbekannter Verbleib aus dem Abfluss. Bis 2019: von Statistiken. Ab 2020: als konstant angenommen.

#### 2.4.5 Anzahl EEG pro Fahrzeug, nach Antriebstyp und Jahrgang

Die Anzahl der EEG pro Fahrzeug wurde aus drei wissenschaftlichen Publikationen von Restrepo et al., die aus dem Projekt EVA I entstanden sind, sowie aus Daten zur Häufigkeit unterschiedlicher Fahrzeugfunktionen in Neufahrzeugen in Deutschland, die aus den Jahresberichten der DAT-Gruppe vorliegen, berechnet.<sup>11-14</sup> Wo erforderlich, wurden diese mit eigenen, auf allgemeinem Wissen basierenden Annahmen erweitert. Die Auflösung der Daten und Annahmen variieren zwischen den verschiedenen EEG. Bei einigen EEG (z.B. ABS-Aktuatoren, elektrischem Servomotor) ist die zeitliche Veränderung enthalten, aber kein Unterschied zwischen den verschiedenen Antriebstypen. Diese EEG sind in Abbildung 9 dargestellt. Bei anderen EEG (z.B. Anlasser, elektrischem Antriebsmotor, Lithium-Ionen-Batterie) wird zwischen den verschiedenen Antriebstypen unterschieden, jedoch keine zeitliche Änderung innerhalb jedes Antriebtyps berücksichtigt. Bei einigen EEG (z.B. Lautsprecher, Instrumente) ist weder die zeitliche Veränderung noch die Abhängigkeit vom Antriebtyp enthalten, da detaillierte Daten fehlen.

Tabelle 9 In den Eingabedaten berücksichtigte Aspekte zur Anzahl der EEG pro Fahrzeug.

Gerättyp	Jahrgang	Antriebstyp	Keine
ABS-Aktuator	x		
Airbagsteuergerät	x		
Alternator		x	
Elektroantriebmotor		x	
Steuergerät Sicherungskasten			x
Elektrischer Servomotor	x		
Motorsteuergerät		x	
ESP-Aktuator	x		
Instrumente			x
Spiegelmotoren	x		
Navigationssystem	x		
Fensterhebermotor	x		
Kühlerlüftermotor			x
Sitzmotoren	x		
Radio/CD/Tonband	x		
Lautsprecher			x
Anlasser		x	
Drosselklappenantrieb		x	
Wischwasserpumpe			x
Wischermotoren			x
Li-Ionen Batterie		x	
NiMH Batterie		x	

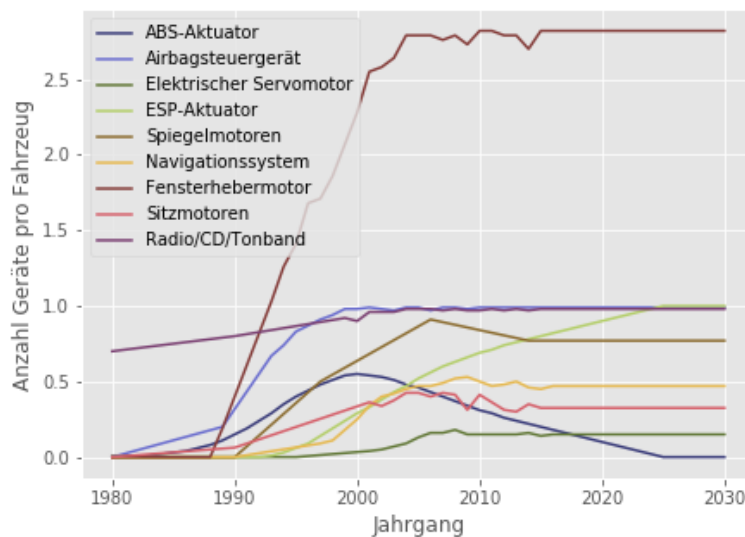


Abbildung 9 Anzahl Geräte pro Fahrzeug. Daten nach 2015: Annahmen.

Tabelle 10 Anzahl Geräte pro Fahrzeug, nach Antriebtyp.

Gerättyp	Benzin	Diesel	Benzin HEV	Diesel HEV	Benzin PHEV	Diesel PHEV	BEV	Andere
Alternator	1	1	0	0	0	0	0	1
Elektroantriebmotor	0	0	1	1	1.2 <sup>a</sup>	1.2 <sup>a</sup>	0.5 <sup>b</sup>	0
Motorsteuergerät	1	1	1	1	1	1	0	1
Anlasser	1	1	0	0	0	0	0	1
Drosselklappenantrieb	1	1	1	1	1	1	0	1
Li-Ionen Batterie	0	0	0.3	0.3	1	1	1	0
NiMH Batterie	0	0	0.7	0.7	0	0	0	0

<sup>a</sup> Annahme: grösser als 1 wegen 4WD. <sup>b</sup> Berechnete Anteil mit Permanentmagnetenmotoren.

#### 2.4.6 Ausbauanteil der EEG bei Autoverwertern

Der Ausbauanteil verschiedener EEG wurde im Projekt EVA I auf der Grundlage der Analyse von Daten eines Schweizer Verwerfers berechnet. Die Anzahl der ausgebauten EEG wurde durch die berechnete Anzahl der EEG in denselben Autos geteilt, die anhand von Daten aus der Auto-i Autohandel-Datenbank berechnet wurde. Für sechs der EEG lagen keine Daten über die Demontagehäufigkeit vor, stattdessen wurden Annahmen getroffen.

Tabelle 11 Ausbauanteil der EEG.

Gerättyp	Ausbauanteil
ABS-Aktuator	41%
Airbagsteuergerät	17%
Alternator	32%
Elektroantriebmotor	50% <sup>a</sup>
Steuergerät Sicherungskasten	3%
Elektrischer Servomotor	30%
Motorsteuergerät	74%
ESP-Aktuator	41%
Instrumente	48%
Spiegelmotoren	70% <sup>a</sup>
Navigationssystem	9%
Fensterhebermotor	39%
Kühlerlüftermotor	25%
Sitzmotoren	30% <sup>a</sup>
Radio/CD/Tonband	8%
Lautsprecher	29%
Anlasser	58%
Drosselklappenantrieb	9%
Wischwasserpumpe	30% <sup>a</sup>
Wischermotoren	75%
NiMH Batterie	100% <sup>a</sup>
Li-Ionen Batterie	100% <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Eigene Annahme.

### 2.4.7 Durchschnittliche Masse und Zusammensetzung der EEG

Es gibt fünf Hauptquellen für umfassende Informationen über die Masse von EEG in Fahrzeugen und deren Zusammensetzung.<sup>15–19</sup> Zusammengenommen liefern diese Quellen Masseangaben zu mehr als 100 Typen von EEG aus Fahrzeugen. Alle Masseangaben aus diesen Quellen wurden durch Probenahme und Wiegen der EEG gewonnen. Vier der Studien<sup>15,16,18,19</sup> umfassten die weitere Demontage der EEG und die Messung der Masse ausgewählter Bauteile, und drei der Studien<sup>15,18,19</sup> umfassten weitere chemische Analysen ausgewählter Bauteile.

Für die meisten EEG wurde die im Modell verwendete durchschnittliche Masse als die durchschnittliche Masse aller Einzelgeräte des gegebenen Typs über alle Quellen berechnet. In einigen Fällen wurden grosse Unterschiede zwischen den Quellen festgestellt, und einige Datenpunkte wurden wegen möglicher Fehlbeschriftung des Geräts oder unterschiedlicher Definitionen ausgeschlossen. Bei fünf EEG konnte eine Veränderung der durchschnittlichen Masse über die Zeit festgestellt und berücksichtigt werden: ABS-Aktuator, ESP-Aktuator, Motor-Steuergerät, Li-Ionen-Batterie und NiMH-Batterie. Eine Abhängigkeit der Gerätemasse vom Antriebstyp wurde für den elektrischen Antriebsmotor, die NiMH-Batterie und die Li-Ionen-Batterie einbezogen.

Die Massenanteile der Bauteile in den EEG wurden ebenfalls als Mittelwert über alle Einzelgeräte in allen Datenquellen berechnet. Aufgrund begrenzter Daten ist derzeit keine zeitliche Änderung in diesen Parametern enthalten.

Leiterplatten wurden, wie im ORKAM-Projekt, in drei Kategorien unterteilt.<sup>16</sup> Für jedes EEG mit einer Leiterplatte wurden die durchschnittlichen Massenanteile der einzelnen Elemente aus den verfügbaren Daten in den Quellen berechnet. Der Typ der Leiterplatte in jedem EEG wurde dann auf der Grundlage des durchschnittlichen gemessenen Goldgehalts abgeleitet (Kategorie 1: >185 ppm; Kategorie 2: 107-185 ppm, Kategorie 3: <107 ppm). Nur für ein EEG (Radio/CD/Tonband) wurde die Leiterplatte als Kategorie 1 eingestuft. Leiterplatten der übrigen EEG wurden als Kategorie 3 eingestuft.

Die Masse und Zusammensetzung der Batterien und Elektroantriebmotoren wurden auf der Grundlage der bekannten Eigenschaften der auf dem Schweizer Markt am häufigsten verkauften HEVs, PHEVs und BEVs berechnet. Daten aus mehreren Quellen wurden gesammelt und kombiniert.<sup>20–27</sup>

Tabelle 12 Durchschnittliche Masse der EEG und Masseanteile der Bauteile in EEG.

Gerättyp	Gerät- masse (kg)	Massenanteile der Bauteile (%)					
		Ferritmag- nete	Neo- dymag- nete	Leiterplat- ten Kat. 1	Leiterplat- ten Kat. 2	Leiterplat- ten Kat. 3	Batterie- zellen
ABS-Aktuator	2.5 <sup>a</sup>	9.4				2.3	
Airbagsteuergerät	0.28					31.2	
Alternator	5.3						
Steuergerät Sicherungskasten	0.55					74.4	
Elektrischer Servomotor	2.2	5.0	2.5				
Motorsteuergerät	0.77 <sup>a</sup>					22.8	
ESP-Aktuator	3.1 <sup>a</sup>	9.4				2.3	
Instrumente	0.71	1.0				23.0	
Spiegelmotoren	0.08	52.7					
Navigationssystem	1.7					19.4	
Fensterhebermotor	1.0	13.7					
Kühlerlüftermotor	2.4	8.5					
Sitzmotoren	0.86	3.8					
Radio/CD/Tonband	1.8			23.6			
Lautsprecher	0.41	11.7	9.1				
Anlasser	3.3	11.9					
Drosselklappenantrieb	0.73	21.0					
Wischwasserpumpe	0.10	73.5					
Wischermotoren	1.8	7.1					
Elektroantriebmotor HEV	23		4.0				
Elektroantriebmotor PHEV	23		4.0				
Elektroantriebmotor BEV	40		4.0				
Li-Ionen Batterie HEV	26 <sup>a</sup>						60
Li-Ionen Batterie PHEV	133 <sup>a</sup>						60
Li-Ionen Batterie BEV	361 <sup>a</sup>						60
NiMH Batterie HEV	39 <sup>a</sup>						61

<sup>a</sup> Wert in 2015. Zeitliche Veränderung berücksichtigt.

Die Elementmassenanteile in Ferritmagneten und Neodym-Magneten wurden aus den von Yano et al. und Nguyen et al. gemessenen Massenanteilen berechnet.<sup>18,19</sup> Aus dem Massenanteil von Neodym lässt sich leicht auf den Magnettyp schliessen. Die überwiegende Mehrheit der Permanentmagnete in Autos scheinen Ferritmagnete zu sein, oft mit einigen wenigen Prozent La. Neodym-Magnete werden hauptsächlich in Lautsprechern, Antriebsmotoren für HEVs, PHEVs und BEVs und möglicherweise in elektronischen Servolenkungsmotoren verwendet.

Die Elementmassenanteile in Leiterplatten wurden als die durchschnittlichen gemessenen Massenanteile in allen analysierten Leiterplatten innerhalb der jeweiligen Kategorie von Leiterplatten berechnet.

Tabelle 13 Massenanteile der Elemente in Bauteilen.

Element	Masseanteile (%)				Masseanteile (ppm)	
	Ferrit- magnete	Neodym- magnete	LIB Zellen	NiMH Zellen	Leiterplatten Kat. 1	Leiterplatten Kat 3.
Ag					1000	200
Au					213	66
Co	0.8		4.5	3	50	11
Dy		3.3			53	27
La	3.2			8.5	102	2.2
Li			2.3			
Nd		25		0.3	557	42
Pd					99	80
Pr		3.2		0.2	39	3
Pt					2	2
Rh					2.3	2.3

## 2.5 Umsetzung und Funktionalität

Das Modell wurde in Python (Version 3.7.3) programmiert. Die folgenden Libraries wurden verwendet: numpy, pandas, matplotlib. Das Modell wurde in zwei Teile programmiert: Teil 1 umfasst die Fahrzeugebene, die unabhängig von den anderen Ebenen berechnet werden kann. Teil 2 umfasst die restlichen drei Ebenen, und übernimmt die Ausgabedaten von Teil 1 als Eingabedaten. Die Kalkulationszeit beträgt 10-15 Sekunden für Teil 1 und 40-60 Sekunden für Teil 2. Jeder Teil besteht aus einem Python-Skript, das Eingabedaten liest, die in Excel-Dateien oder numpy-Archiven gespeichert sind, alle Berechnungen durchführt, Daten in Excel-Dateien und numpy-Archive exportiert und verschiedene Grafiken erstellt.



### 3 Resultate

#### 3.1 Vergleich von Modellergebnissen zu Statistiken

Die durch das Modell berechnete Gesamtzahl der Fahrzeuge in verschiedenen Massenströmen wird in Abbildung 10 mit Statistiken verglichen. Das Modell berechnet sowohl die wichtigsten Trends als auch die Verteilung der Abfluss auf verschiedene Jahrgänge (unteres mittleres und unteres rechtes Bild) gut. Eine grössere Abweichung zwischen Modellresultate und Statistiken ist für Neuzulassungen und Abfluss in früheren Jahren zu beobachten, möglicherweise, weil die Lebensdauer der Fahrzeuge in der Vergangenheit kürzer war. Die Verteilung der Jahrgänge passt gut zu den im Jahr 2013 geschredderten Fahrzeugen (unteres mittleres Bild), was zu erwarten ist, da Daten aus diesem Jahr zur Kalibrierung des Modells verwendet wurden. Für die späteren Jahre hat die beobachtete Verteilung der Jahrgänge eine andere Form als die modellierte Verteilung (unteres rechtes Bild). Dies könnte auf den bevorzugten Export von jüngeren Autos zurückzuführen sein.

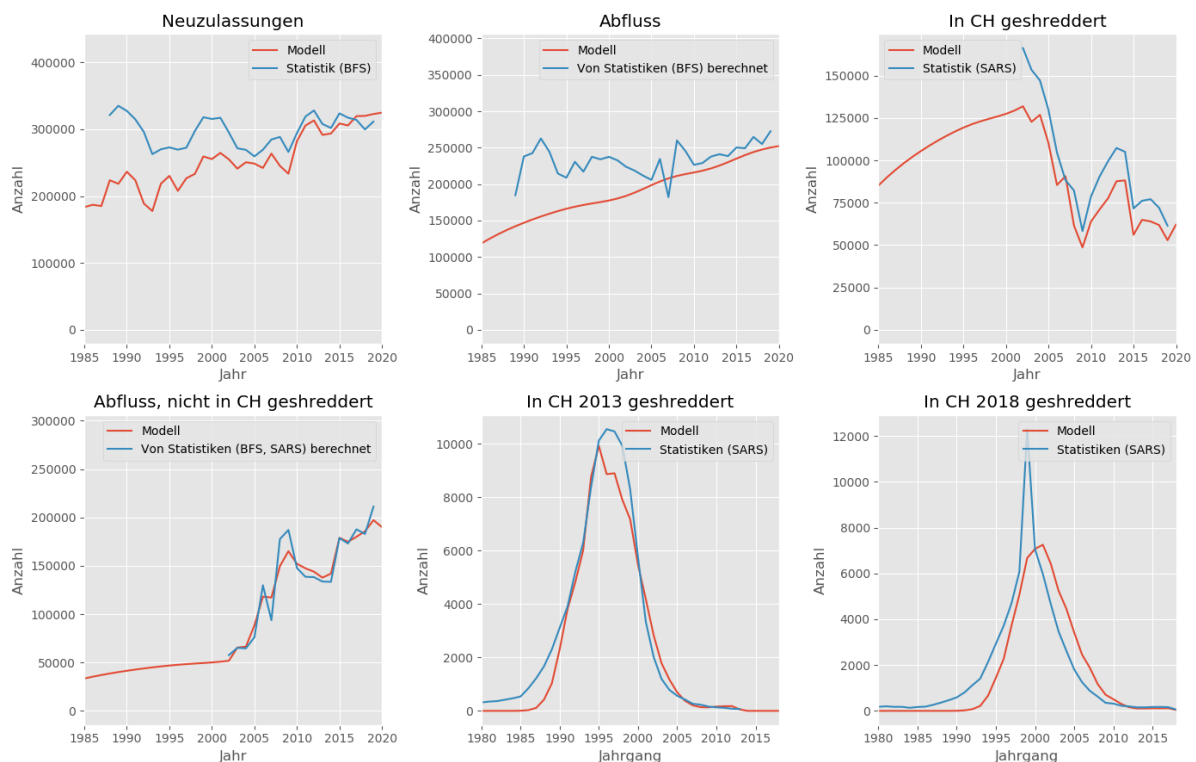


Abbildung 10 Vergleiche zwischen Modellresultaten (rot) und Statistiken (blau). Hinweis: Die Bilder unten in der Mitte und unten rechts zeigen die Anzahl der geschredderten Fahrzeuge während eines Jahres nach Jahrgang (x-Achse) der Fahrzeuge.

#### 3.2 Antriebstypen im Bestand und unter den Altfahrzeugen

Die berechnete Anzahl der Personenwagen in verschiedenen Massenströmen und dem Bestand sind in Abbildung 11 dargestellt. Die angenommene Erhöhung des Marktanteils moderner Antriebe, die im linken oberen Teil der Abbildung 11 zu sehen ist, wird im Abfluss ( $N_{ix}$ ) mit einer Verzögerung von ca. 16 Jahren deutlich sichtbar. Dies bedeutet, dass selbst bei einem raschen

Wachstum von Elektrofahrzeugen die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren voraussichtlich noch ein weiteres Jahrzehnt (bis etwa 2030) den Abfluss dominieren werden.

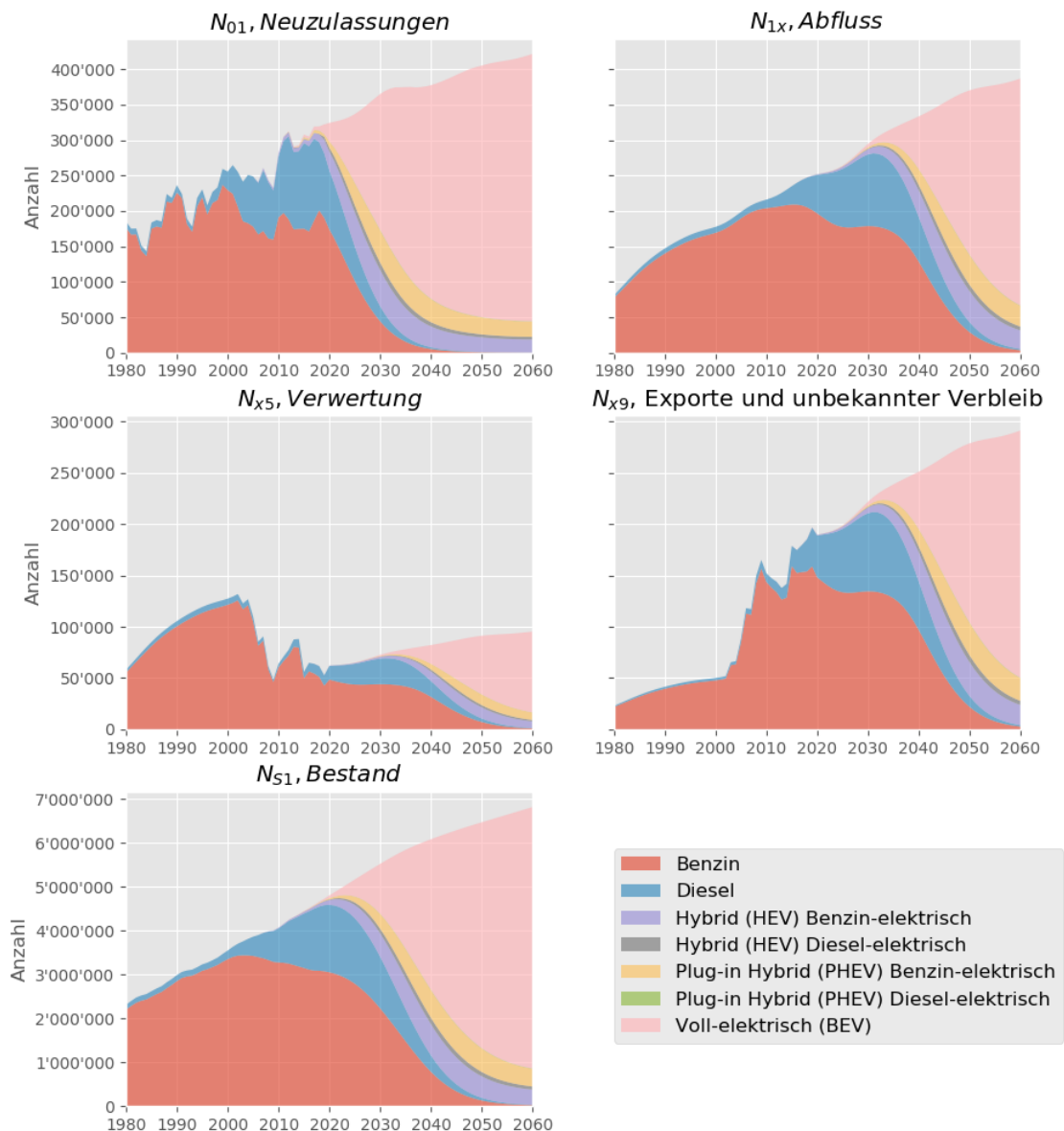


Abbildung 11. Berechnete Anzahl Personenwagen in verschiedenen Massenströmen und dem Bestand nach Antriebstyp. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von Elektrofahrzeugen schnell wachsen und die nicht in der Schweiz verwerteten Altfahrzeuge auf dem heutigen Niveau von 75% bleiben. Dies stellt nur eine mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden.

### 3.3 EEG im Abfluss

Die Gesamtzahl und Gesamtmasse der EEG im Abfluss sind in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellt. Es wird erwartet, dass die Massenströme bis etwa 2025 in bescheidenem Tempo weiter zunehmen werden, wobei die grössten Beiträge von verschiedenen elektrischen Maschinen in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, wie z.B. dem Generator und dem Anlasser, geleistet werden. Nach 2025, und insbesondere nach 2030, ist ein rasches Wachstum von Batterien und

Elektroantriebsmotoren zu beobachten. Rund 2035 wird der Massenstrom dieser EEG grösser als die kombinierten Massenströme aller anderen im Modell enthaltenen EEG.

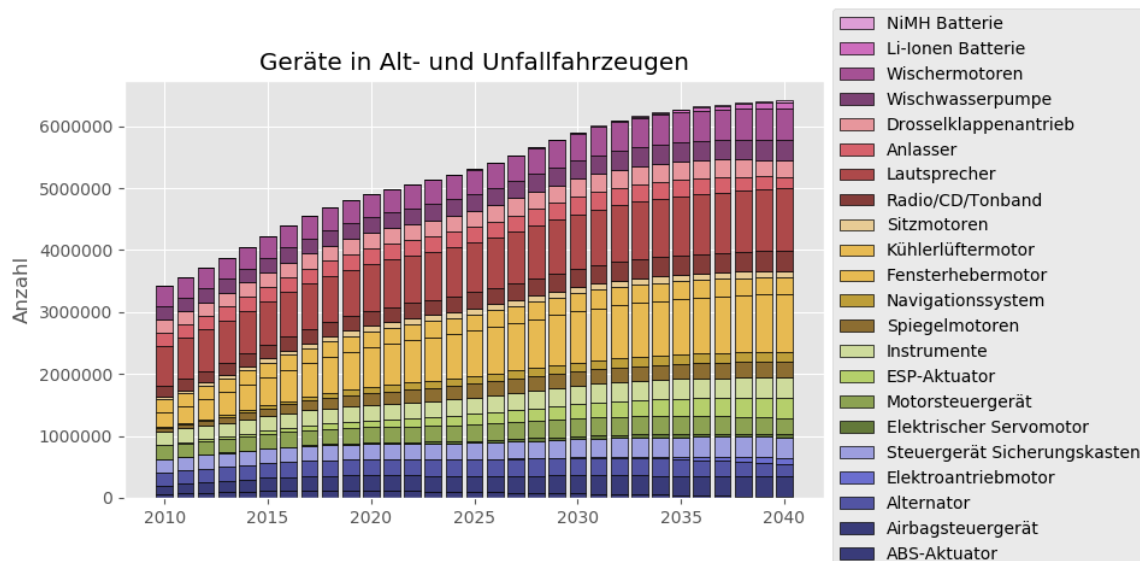


Abbildung 12 Berechnete Anzahl der EEG in Alt- und Unfallfahrzeugen. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von Elektrofahrzeugen schnell wachsen. Dies stellt nur eine mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden.

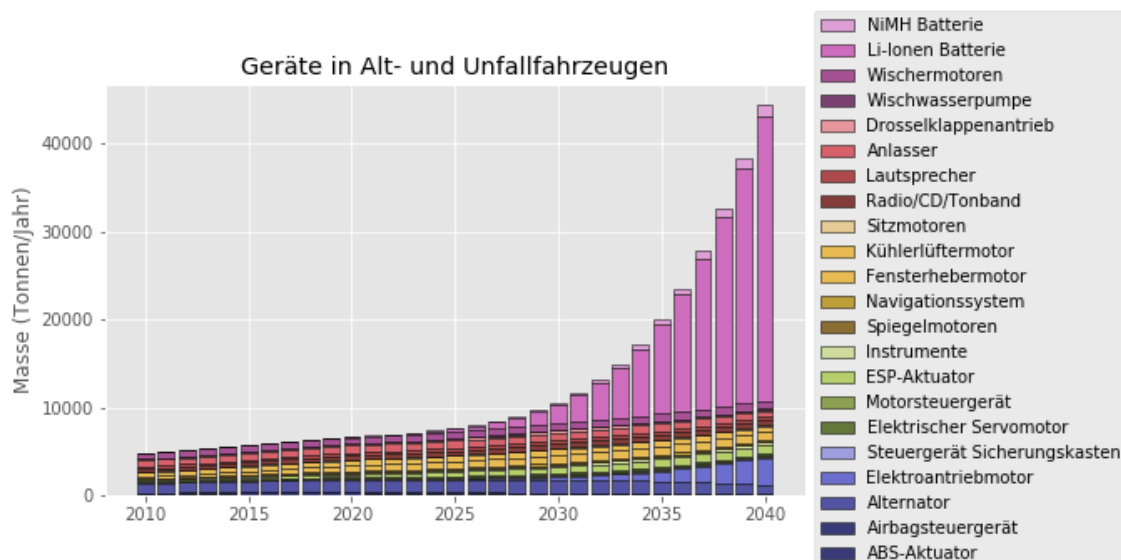


Abbildung 13 Berechnete Masse der EEG in Alt- und Unfallfahrzeugen. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von Elektrofahrzeugen schnell wachsen. Dies stellt nur eine mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden.

### 3.4 Gold, Neodym, Lanthan und Lithium im Abfluss

Die berechneten Massenströme von Gold, Neodym, Lanthan und Lithium im Abfluss sind in Abbildung 14, Abbildung 15, Abbildung 16 und Abbildung 17 abgebildet.

Der Massenstrom von Gold wird von Audiosystemen, Sicherungskästen, Motorsteuergeräten, Instrumenten und Navigationssystemen dominiert. Es wird erwartet, dass er von seiner derzeitigen Masse von 30 bis 40 kg/a stetig weiterwachsen wird.

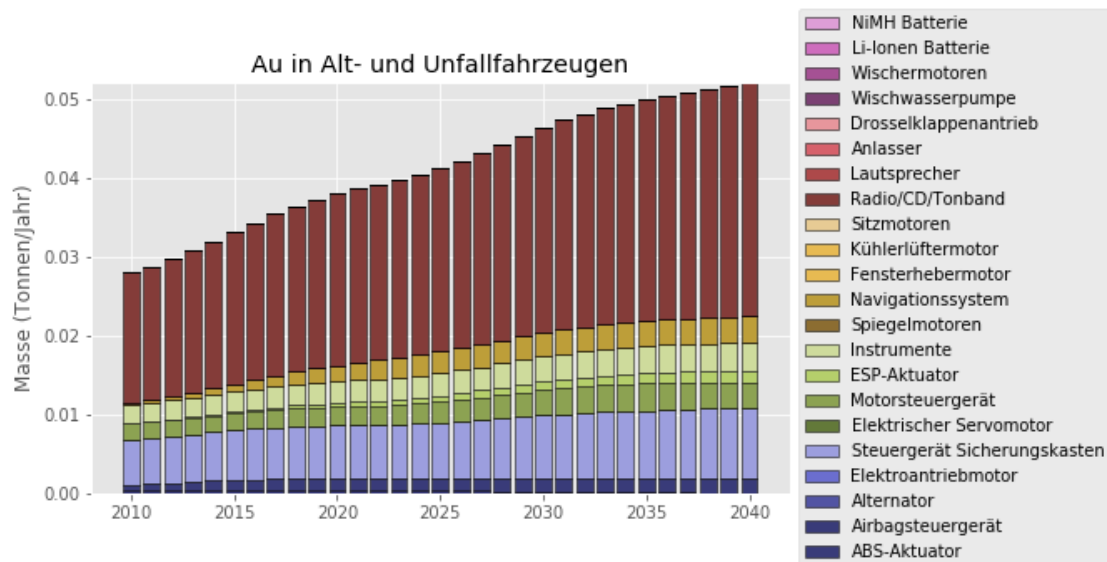


Abbildung 14 Berechnete Masse von Gold in Alt- und Unfallfahrzeugen. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von Elektrofahrzeugen schnell wachsen. Dies stellt nur eine mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden.

Der Massestrom von Neodym wird derzeit auf etwa 8 Tonnen pro Jahr berechnet, wobei mehr als 95% davon in Lautsprechern enthalten sind. Der Beitrag von Elektroantriebsmotoren beginnt in der Grafik zwischen 2020 und 2025 sichtbar zu werden. Zwischen 2030 und 2035 nimmt er rasch zu und erreicht eine höhere Menge als die in Lautsprechern enthaltene. In 2040 sind ca. 75% des Neodyms in Elektroantriebsmotoren enthalten.

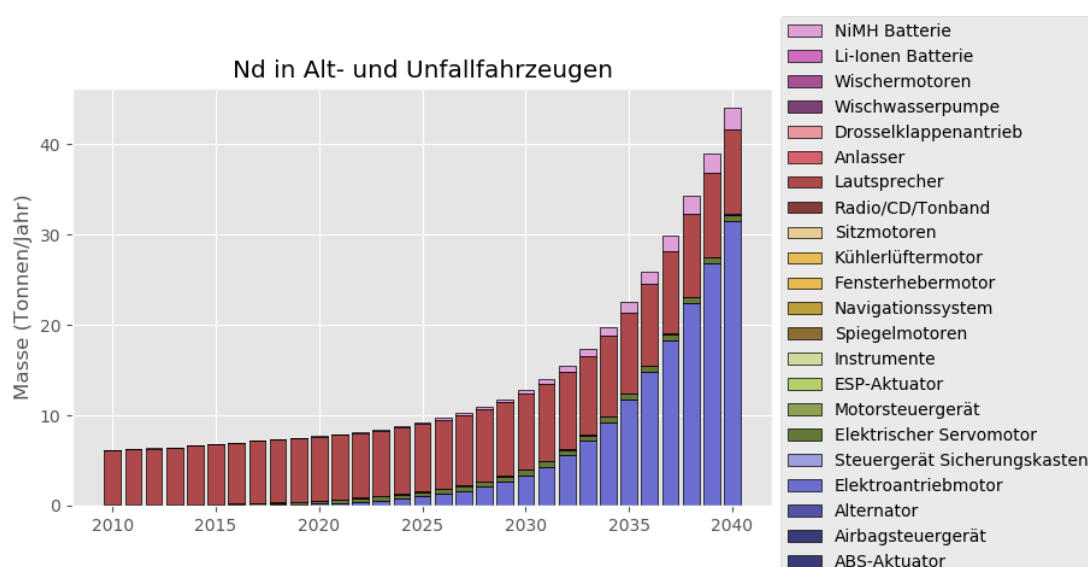


Abbildung 15 Berechnete Masse von Neodym in Alt- und Unfallfahrzeugen. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von Elektrofahrzeugen schnell wachsen. Dies stellt nur eine

mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden.

Der gesamte Massenstrom von Lanthan wird derzeit auf etwas weniger als 20 Tonnen pro Jahr berechnet (etwas weniger als Neodym). Aufgrund der weit verbreiteten Verwendung von Ferritmagneten verteilt sich das Lanthan auf eine grössere Vielfalt von EEG. Es wird erwartet, dass NiMH-Batterien bis 2025 den grössten Beitrag zu den gesamten End-of-Life-Strömen leisten werden, und irgendwann zwischen 2030 und 2035 wird voraussichtlich mehr Lanthan in NiMH-Alt-Batterien enthalten sein als in allen anderen EEG zusammen.

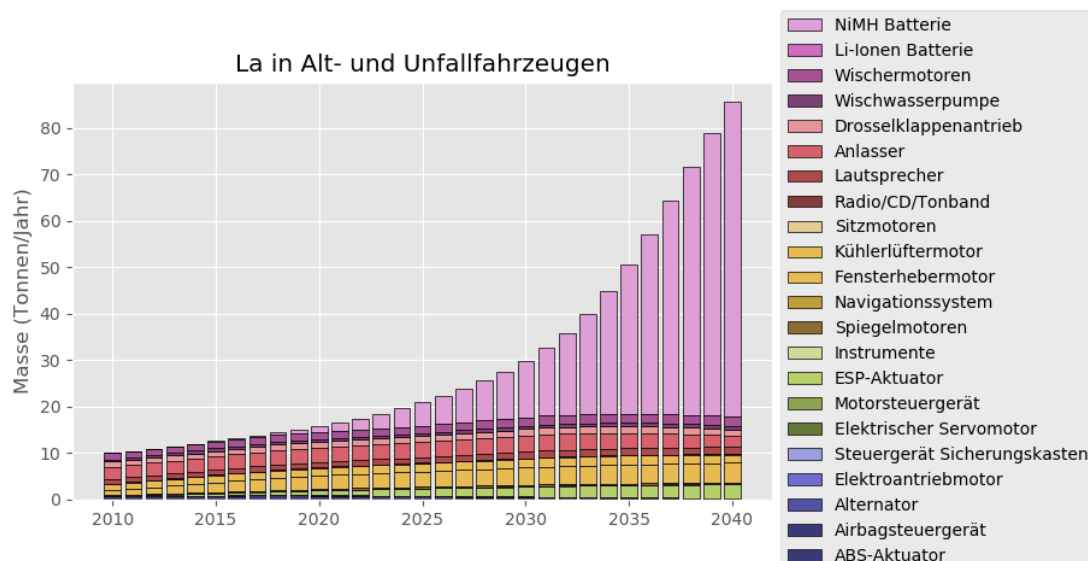


Abbildung 16 Berechnete Masse von Lanthan in Alt- und Unfallfahrzeugen. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von Elektrofahrzeugen schnell wachsen. Dies stellt nur eine mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden.

Die simulierten Massenströme von Lithium sind in Abbildung 17 dargestellt. Der einzige nennenswerte Beitrag kommt von Lithium-Ionen-Batterien. Aufgrund des erwarteten exponentiellen Wachstums erscheinen die Zahlen am Anfang der Kurve in Abbildung 17 relativ niedrig. Bereits im Jahr 2025 wird jedoch ein Massenstrom von etwa 5 Tonnen pro Jahr erwartet.

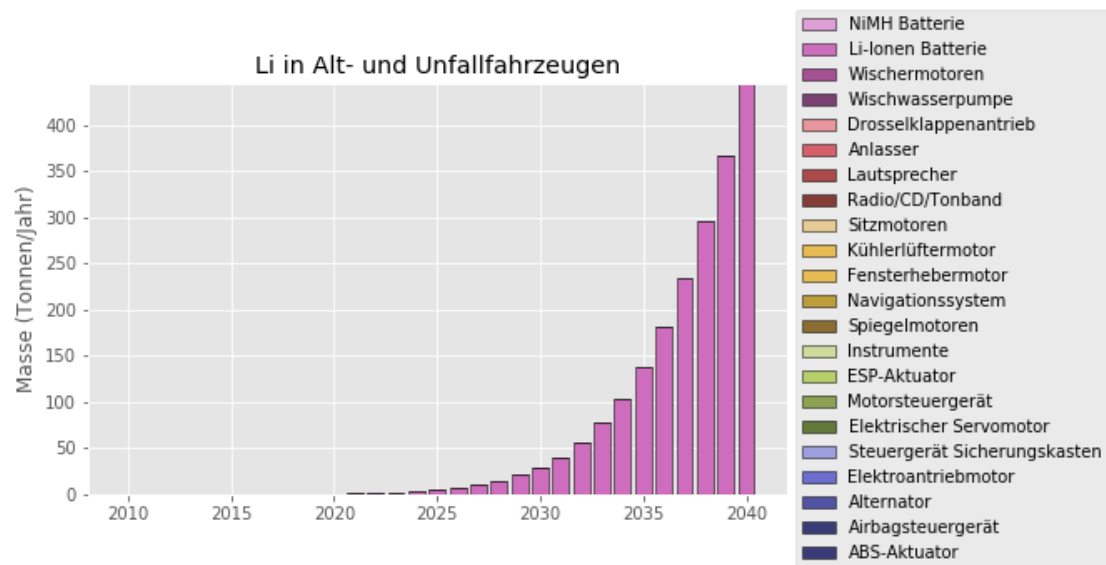


Abbildung 17 Berechnete Masse von Lithium in Alt- und Unfallfahrzeugen. Hinweis: Die Ergebnisse zeigen ein mögliches Szenario, in dem die Marktanteile von Elektrofahrzeugen schnell wachsen. Dies stellt nur eine mögliche Entwicklung von vielen dar und sollte nicht als Vorhersage der wahrscheinlichsten Entwicklung interpretiert werden.

## 4 Fazit und nächste Schritte

Ein dynamisches Stoffflussmodell wurde entwickelt, um die Massenströme von 22 EEG- und 11 chem. Elementen durch das schweizerische Personenwagensystem und die damit verbundenen End-of-Life-Prozesse zu berechnen. Das Modell kann dazu verwendet werden, durch die Definition von Szenarien die zukünftigen Massenströme zu simulieren und damit die Auswirkungen verschiedener Entwicklungen zu untersuchen.

Es wurde aufgezeigt, wie ein rasches Wachstum des Elektro- und Hybridfahrzeugbestandes (was eine Fortsetzung des gegenwärtigen Trends darstellt), zu wesentlichen Veränderungen der End-of-Life-Ströme von EEG führen wird. Bezogen auf die Gesamtmasse wird erwartet, dass zwischen 2025 und 2030 ein wesentlicher Beitrag neuer EEG (Batterien und elektrische Antriebsmotoren) zu den End-of-Life-Strömen hinzukommen wird. Für die Massenströme der einzelnen Elemente sind die Folgen der Elektrifizierung des Fahrzeugbestandes unterschiedlich: Während die Massenströme von Gold nach wie vor von EEG dominiert werden, die in allen Fahrzeugtypen enthalten sind, werden sich die Massenströme von Neodym, Lanthan und Lithium durch die veränderte Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes deutlich verändern. Dies deutet auf Herausforderungen bei der Anpassung des derzeitigen Altfahrzeugmanagements in der Schweiz sowie auf neue Möglichkeiten zur Rückgewinnung von Metallen hin.

Bei der weiteren Anwendung des dynamischen Stoffflussmodells im Rahmen des Projekts werden die folgenden Punkte besonders hervorgehoben:

- Entwicklung und Analyse eines breiteren Spektrums von Szenarien, z.B.:
  - Berücksichtigung sowohl der langsameren als auch der schnelleren Einführung von Elektrofahrzeugen
  - Berücksichtigung anderer Entwicklungen für die Gesamtzahl des Fahrzeugbestandes, z.B. Stabilisierung auf dem heutigen Niveau
  - Sensitivitätsanalyse, unter anderem in Bezug auf die durchschnittliche Lebensdauer von Fahrzeugen
- Kalibrierung des Modells mit Daten über Metallrückgewinnungsraten in den verschiedenen Recyclingprozessen
- Untersuchungen von EEG-Massenströmen durch den Reparaturprozess (z.B. über eine Umfrage unter Werkstätten und anderen Akteure)
- Einbeziehung weiterer EEG, insbesondere neuerer Typen (z.B. Wechselrichter und Batteriemanagementsysteme in Hybrid- und Elektrofahrzeugen), möglicherweise einschliesslich Probenahme und Analyse derer Zusammensetzung

## 5 Referenzen

1. Bundesamt für Statistik. Strassenfahrzeugbestand nach Fahrzeuggruppe. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassenfahrzeuge-bestand-motorisierungsgrad.assetdetail.8469801.html> (2019).
2. Restrepo, E., Løvik, A. & Widmer, R. Projekt 'EVA' Szenarien und Dynamik: Schlussbericht zu der Arbeitspaket C3. (2018).
3. Stiftung Autorecycling Schweiz. Geshredderte Fahrzeuge 2008-2018. (2019).
4. Bundesamt für Statistik. Strassenfahrzeugbestand: Personenwagen 2005-2009. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/daten.assetdetail.290135.html> (2015).
5. Bundesamt für Statistik. Strassenfahrzeugbestand: Personenwagen 2010-2014. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/daten.assetdetail.269638.html> (2016).
6. Bundesamt für Statistik. Strassenfahrzeugbestand: Personenwagen ab 2015. [https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/daten.html?dyn\\_prodima=900175](https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/daten.html?dyn_prodima=900175) (2019).
7. Bundesamt für Statistik. Neue Inverkehrsetzungen von Personenwagen (1). <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassen-neu-inverkehrsetzungen.assetdetail.7226904.html> (2019).
8. Auto-Schweiz. Alternative Antriebe. <https://www.auto.swiss/statistiken/alternative-antriebe> (2019).
9. European Alternative Fuels Observatory. European Alternative Fuels Observatory: Switzerland. <https://www.eafo.eu/countries/european-union/23640/summary/compare> (2019).
10. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division. UN Comtrade Database. <https://comtrade.un.org/> (2019).
11. Restrepo, E. et al. Stocks, flows and distribution of critical metals in embedded electronics in passenger vehicles. *Environmental Science & Technology* **51**, 1129–1139 (2017).
12. Restrepo, E., Løvik, A. N., Widmer, R., Wäger, P. & Müller, D. B. Historical Penetration Patterns of Automobile Electronic Control Systems and Implications for Critical Raw Materials Recycling. *Resources* **8**, 58 (2019).
13. Restrepo, E., Løvik, A. N., Widmer, R., Wäger, P. & Müller, D. B. Effects of car electronics penetration, integration and downsizing on their recycling potentials. *Resources, Conservation & Recycling: X* 100032 (2020) doi:10.1016/j.rcrx.2020.100032.
14. Deutsche Automobil Treuhand GmbH. DAT Report 2016. [http://www.autokiste.de/service/dat-report/download/DAT-Report\\_2016\\_en.pdf](http://www.autokiste.de/service/dat-report/download/DAT-Report_2016_en.pdf) (2016).
15. Widmer, R., Du, X., Haag, O., Restrepo, E. & Wäger, P. A. Scarce Metals in Conventional Passenger Vehicles and End-of-Life Vehicle Shredder Output. *Environ. Sci. Technol.* **49**, 4591–4599 (2015).
16. Groke, M., Kaerger, W., Sander, K. & Bergamos, M. Optimierung der Separation von Bauteilen und Materialien aus Altfahrzeugen zur Rückgewinnung kritischer Metalle (ORKAM). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/2017-01-11\\_texte\\_02-2017\\_orkam\\_endbericht.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/2017-01-11_texte_02-2017_orkam_endbericht.pdf) (2017).



17. Restrepo, E., Loevik, A. & Widmer, R. Projekt 'EVA': Existierender EAG Ausbau aus AltFhz; EAG Entnahmetests; Entfrachtungstests von AltFhz: Zwischenbericht zu den Arbeitspaketen A1, A2 und A3. 71 (2017).
18. Nguyen, R. T., Imholte, D. D., Matthews, A. C. & Swank, W. D. NdFeB content in ancillary motors of U.S. conventional passenger cars and light trucks: Results from the field. *Waste Management* **83**, 209–217 (2019).
19. Yano, J. et al. Resource and toxic characterization in end-of-life vehicles through dismantling survey. *J Mater Cycles Waste Manag* (2019) doi:10.1007/s10163-019-00902-9.
20. Wagner, M. et al. ORAMA Deliverable Report D2.3: Draft Good Practice Guidelines for the Collection of SRM Data, Improvement Potential, Definition and Execution of Case Studies. [https://orama-h2020.eu/wp-content/uploads/ORAMA\\_WP2\\_DEL2.3\\_20192905\\_v1.0.pdf](https://orama-h2020.eu/wp-content/uploads/ORAMA_WP2_DEL2.3_20192905_v1.0.pdf) (2019).
21. Løvik, A. N. et al. ProSUM Deliverable Report 2.5: Report on consolidation of data into CRM database. <http://www.prosumproject.eu/information-network-reports> (2017).
22. Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M. & Pasaoglu, G. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **89**, 292–308 (2018).
23. United States Environmental Protection Agency (EPA). EPA's Transportation and Air Quality Document Index System (DIS). <https://iaspub.epa.gov/otaqpub/publist1.jsp> (2019).
24. Battery University. BU-1003: Electric Vehicle (EV) – Battery University. [https://batteryuniversity.com/learn/article/electric\\_vehicle\\_ev](https://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle_ev) (2019).
25. Toyota. Toyota Service Information: Hybrid vehicle dismantling manual. <https://www.toyota-tech.eu/HybridInfo.aspx?Cat=HVDM> (2019).
26. Dai, Q., Kelly, J. C., Dunn, J. & Benavides, P. T. Update of Bill-of-materials and Cathode Materials Production for Lithium-ion Batteries in the GREET Model. [https://greet.es.anl.gov/files/update\\_bom\\_cm](https://greet.es.anl.gov/files/update_bom_cm) (2018).
27. Xu, G., Yano, J. & Sakai, S. Scenario analysis for recovery of rare earth elements from end-of-life vehicles. *J Mater Cycles Waste Manag* 1–14 (2016) doi:10.1007/s10163-016-0487-y.



