

2018

Projekt "EVA": Elektronik – Verwertung - Alautos "Zusammenfassung der Aktivitäten und Resultate"

Zusammenfassung EVA und Schlussbericht zum Arbeitspaket C5



Auftraggeber

Arbeitsgruppe Projekt EVA (Elektronik-Verwertung-Altautos):

AGVS, Altola AG, AMAG Import AG, auto-schweiz, AWEL, Bundesamt für Umwelt (BAFU), EMPA, Häfeli-Brügger AG Kaufmann Recycling AG, Stiftung Auto Recycling Schweiz (SARS), Schaufelberger René Consulting GmbH, Thommen Furler AG, VASSO.

Bearbeitung

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

Begleitung BAFU

Isabelle Baudin, Michael Hügi, Marco Buletti

Autoren ¹

Eliette Restrepo (A1, A2, A3, B1, B2, C1, C3, C5)

Amund N. Løvik (B1, B2, C1, C2, C3, C5)

Arthur Haarman (C4, C5)

Rolf Widmer (EVA Projektleitung)

Betreuung und Überprüfung

Patrick Wäger ¹

Heinz Böni ¹

Roland Hischier ¹

Daniel B. Müller (Norwegian University of Science and Technology – NTNU)

Danksagung

Lorena Toledo¹ (B1, B2)

Arbeitsgruppe Projekt EVA

Hinweis:

Die Untersuchungen im EVA Projekt wurden mit finanziellen oder namhaften Sacheinlagen von verschiedenen Mitgliedern der Arbeitsgruppe "Projekt EVA" durchgeführt. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Akronyme und Abkürzungen

ABS	Antilock Braking System	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control	Adaptive Geschwindigkeitsregelung
AGVS		Automobil Gewerbe Verband Schweiz
AMAG		not an abbreviation?
AP	Work Package	Arbeitspaket
ASR	Automobile Shredder Residue	Auto Schredderrückstände
auto-schweiz	Swiss association of automobile importers	Schweizer Automobil-Importeure
AWEL	Office of Waste, Water, Energy, and Air of the canton of Zurich	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich
BA	(Incinerator) Bottom Ash	(KVA-) Schlacke
BAFU	Federal Office for the Environment	Bundesamt für Umwelt
CBC	Cornering Brake Control	Kurvenbremsen-Steuerung
CD	Compact Disc	Compact Disc
CH	Switzerland	Schweiz
CMs	Critical Metals	Kritische Metalle
D&D	Depollution & Dismantling	Entgiftung & Demontage
dMFA	Dynamic Material Flow Analysis	Dynamische Materialflussanalyse
DRL	Daytime Running Lamps	Tagfahrleuchten
DSR	Driver Steering Recommendation	Empfehlung zur Fahrerlenkung
EBD	Electronic Brake-force Distribution	Elektronische Bremskraftverteilung
ECS	Electronic Control System	elektronische Kontrollsysteme
EE	Electrical and Electronic	Elektrische und elektronische
EEE	Electrical and Electronic Equipment	Elektrische und elektronische Geräte (EEG)
EEG	Electrical and Electronic Device	Elektrische und elektronische Geräte
ELV	End-of-Life Vehicle	Altfahrzeug
EM	Electric Motor	Elektromotor
EPS	Electronic Power Steering	Elektronische Servolenkung
ESP	Electronic Stability Program	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EU	European Union	Europäische Union
EV	Electric Vehicle	Elektrofahrzeug
EVA	Recycling Electronics from ELVs	Elektronik-Verwertung-Altautos
FEDRO	Swiss Federal Roads Office	Amt für Strassen (ASTRA)
Fhz	Vehicle	Fahrzeug (siehe auch PKW)
FOEN	Swiss Federal Office for the Environment	Bundesamt für Umwelt (BAFU)
GPS	Global Positioning System	Globales Positionsbestimmungssystem
GWP	Global Warming Potential	Treibhauspotenzial
H/AC	Heating and Air Conditioning	Heizung und Klimatisierung
HEV	Hybrid Electric Vehicle	Hybrid-Elektrofahrzeug
HHC	Hill-Hold Control	Hill-Hold-Steuerung
HMFA	Hierarchical material flow analysis	Hierarchische Materialflussanalyse
IBA	Incinerator Bottom Ash	Verbrennungsofen Bodenasche
IBM	Industrial Base Metal	industrielle Basismetalle
ICE	Internal Combustion Engine	Verbrennungsmotor
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry	Induktiv gekoppelte Plasma-Massenspektrometrie
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry	Induktiv gekoppelte optische Plasma-Emissionsspektrometrie
IKS-Geräte	Information- Communication and Control-Devices	Informations- Kommunikations- und Steuergeräte
IMO	Integrated Mobility (scenario)	Integrierte Mobilität (Szenario)
IT	Information Technology	Informationstechnik
KEZO	Zurich Oberland waste management association	Zweckverband Kehrichtverwertung Zürcher Oberland
KVA	Municipal Solid Waste Incinerator	Kehrichtverbrennungsanlage
LCA	Life Cycle Assessment	Ökobilanz
LCD	Liquid Crystal Display	Flüssigkristallanzeige

LCI	Life Cycle Inventory	Lebenszyklus-Inventar
LCIA	Life Cycle Impact Assessment	Umweltverträglichkeitsprüfung
LED	Light Emitting Diode	Licht emittierende Diode
MFA	Mass Flow Analysis	Massenstromanalyse
MOFIS	Vehicle Registration Database	Automatisierte Fahrzeug und Fahrzeughalterregister
MSWI	Municipal Solid Waste Incinerator	Kehrichtverbrennungsanlage (KVA)
NEP	New Energy Policy (scenario)	Neue Energiepolitik (Szenario)
NiMH	Nickel Metal Hydride	Nickel-Metall-Hydrid
NTNU	Norwegian University of Science and Technology	
OBDS	On Board Diagnostics System	On-Board-Diagnosesystem
PGM	Platinum Group Metal	Platingruppe Metall
PHE	Plug-in Hybrid Electric Vehicle	Plug-in Hybrid-Elektrofahrzeug
PKW	Passenger Car	Personenkraftwagen
PM	Precious Metal	Edelmetall
PWB	Printed Wiring Board	Gedruckte Leiterplatte
REACH (EU REACH)	European Union Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals	Europäische Union Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien
REE	Rare Earth Element	Seltenerden Element
REF	Reference Scenario	Referenz-Szenario
RESH	Mixed Shredder Residue	Reststoffe aus Schreddern
RoHS (EU RoHS)	European Union legislation on the Restriction Of certain Hazardous Substances in EEE	Rechtsvorschriften der Europäischen Union zur Beschränkung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten
S&S	Shredding And Separation	Zerkleinerung und Trennung
SARS	Foundation Auto Recycling Switzerland	Stiftung Autorecycling Schweiz
SD	System Dynamics	Systemdynamik
SENS		not an abbreviation?
SI	Supplementary Information	Ergänzende Informationen
SLF	Shredder Light Fraction	SchredderLeichtFraktion
SLRS		Stiftung Licht Recycling Schweiz
SMO	Shared Mobility (scenario)	Gemeinschaftliche Mobilität (Szenario)
STM	Scarce Technology Metals	Seltene Technologie Metalle
TCS	Traction Control System	Traktionskontrollsystem
UBP	Environmental impact points	Umweltbelastungspunkte
UE	Entertainment Electronics	Unterhaltungselektronik
VAREX	Swiss association of automobile recyclers and exporters	Vereinigung AutoRecycling und EXport Schweiz
VASSO	Association of the Official Car Collection Point Proprietors of Switzerland and the Principality of Liechtenstein	Vereinigung der offiziellen Autosammelstellenhalter der Schweiz und des Fürstentum Liechtensteins
VDC	Vehicle Dynamics Control	Fahrdynamikregelung
VREG	Ordinance on the return, take-back and disposal of electrical and electronic equipment	Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte
WD-XRF	Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence spectrometry	Wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenzspektrometrie
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment	Elektro- und Elektronik-Altgeräte
WEEE-SLF	SLF produced during pre-processing of WEEE	SLF entsteht bei der Vorbehandlung von WEEE

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Hintergrund.....	1
1.2	EVA in Kürze.....	1
2	EVA: Fragen und Antworten	5
2.1	Welche automobilen EE-Geräte sind die Hauptquellen von STMs?.....	5
2.2	Was sind die aktuellen Lagerbestände und Ströme von STMs in der schweizerischen Fahrzeugflotte?.....	10
2.3	Was sind die aktuellen STM-Massenanteile in der SLF?	14
2.4	Wie hoch ist die aktuelle Demontagequote von STM-reichen EE-Geräten?	17
2.5	Was ist der (Zeit)Aufwand für die Demontage von STM-reichen EE-Geräten?	18
2.6	Was sind die Einsparungen an Umweltbelastungen durch die Demontage von STM-reichen Geräten?	20
2.7	Welche EE-Geräte sollten demontiert werden, um den Umweltnutzen zu maximieren und den Demontageaufwand zu minimieren	24
2.8	Was ist das zukünftige Potenzial für das automobilen EEG Recycling?	26
3	Ergebnisse und Ausblick	32
4	Bibliographie	34

1 Einführung

1.1 Hintergrund

Moderne Personenkraftwagen (PKWs) enthalten ein breites Spektrum an geochemisch seltenen und technologisch wichtigen Metallen - sogenannte "Seltene Technologie-Metalle" (STM), d.h. Edel-, Seltene Erden- und andere Spezialmetalle. Eine der Hauptanwendungen von STMs sind elektrische und elektronische Geräte (EEG wie z.B. Steuerungen, Aktoren und Sensoren), die zunehmend in Autos eingebettet sind. EEG machen derzeit ca. 30% der Gesamtkosten eines Autos aus und sollen bis 2030 [1] auf 50% steigen. Es ist daher zu erwarten, dass die Mengen an STMs in Altfahrzeugen (ELV) in den kommenden Jahren drastisch ansteigen werden. In aktuellen ELV-Managementsystemen, die in erster Linie für den sicheren Umgang mit Gefahrstoffen und die Rückgewinnung von Basismetallen ausgelegt sind (hier mit IBMs= Industrial Base Metals abgekürzt, wie z.B. Eisen, Aluminium und Kupfer), gehen STMs häufig verloren, meist sowohl als unerwünschte Begleitelemente (tramp elements) in IBM Rezyklaten als auch in der SLF [2]. Verschiedene Massnahmen können in Betracht gezogen werden, um die STM-Rückgewinnung zu verbessern: STM-reiche EE-Geräte könnten vor der Zerkleinerung von ELVs demontiert und in Anlagen verarbeitet werden, in denen ihr STM-Gehalt zurückgewonnen werden kann. Beispiele für heutige, industrielle Verarbeitungen sind Katalysatoren im Abgassystem, Blei- und Lithiumbatterien sowie Leiterplatten, die mit elektronischen Bauteilen bestückt sind. Vorerst im Labormassstab sind Anlagen zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen in Hochleistungsmagneten aus Elektromotoren und anderen Aktoren. Alternativ oder zusätzlich können Massnahmen zur Rückgewinnung von STMs aus der SLF vor oder nach der Verbrennung, z.B. durch moderne Schlackeaufbereitungstechnologien, durchgeführt werden. Allerdings sind Recyclingstrategien für größere STM-Mengen, die in zukünftigen ELV-Strömen erwartet werden, nur unzureichend verstanden, was hauptsächlich auf einen begrenzten Überblick der eingebetteten EEG und dem Verbleib der freigesetzten STMs in aktuellen oder geplanten Behandlungsansätzen zurückzuführen ist.

Die laufende Revision der schweizerischen Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) sieht vor [3], den rechtlichen Rahmen für eine verstärkte Verwertung von STMs, soweit dies technisch möglich, wirtschaftlich tragbar und ökologisch sinnvoll ist, zu schaffen. Dazu ist insbesondere eine obligatorische Entfernung und Folgebehandlung von in Altfahrzeugen und Gebäuden eingebetteten elektrischen und elektronischen Altgeräten (EAG) vorgesehen, sofern deren Ausbau mit verhältnismässigem Aufwand möglich ist.

Das Projekt „Elektronik Verwertung aus Altautos“ (im Folgenden als Projekt "EVA" bezeichnet), ist die Nachfolge des Projektes "Verwertungspotential seltener technischer Metalle aus der Automobilelektronik in der Schweiz".

1.2 EVA in Kürze

"EVA" befasst sich mit der optimierten Rückgewinnung von STMs aus in Fahrzeugen eingebetteten EEGs und deren spezieller Behandlung z.B. in bestehenden EAG Behandlungsanlagen bzw. bei der RESH Entsorgung vor und/oder nach dessen Verbrennung. Ziel des Projektes ist es, Grundlagen dafür zu liefern, welche Kombination der verschiedenen Behandlungsprozesse die STM Rückgewinnung steigert und welche dafür geeignetsten EEG sich dazu unter "verhältnismässigem Aufwand" aus ELVs entfernen lassen.

Ein zusätzliches Ziel des EVA-Projekts war es, die VREG-Revision zu unterstützen durch die Bereitstellung von:

- Daten zur Masse und Verteilung von STMs in EE-Geräten, die in Autos eingebaut sind, sowie zur Demontagezeit und Demontagequote ausgewählter EE-Geräte bei ausgewählten schweizerischen Autoverwertern.
- neue und zuverlässigere Daten über Massenanteile ausgewählter STMs (Au, Co, Dy, La, Nd, Pt, Sn, Y, Yb), gefährlicher Metalle (Cd, Pb, Sb) und Grundmetalle einschließlich einiger Legierungselemente (Al, Cr, Fe, Ni) in SLFs. Darüber hinaus sollte die Studie Informationen über die Abhängigkeit der SLF-Zusammensetzung vom Alter der geschredderten ELVs sowie über die Verteilung von STMs und anderen Metallen innerhalb verschiedener Bestandteile der SLF liefern.
- Daten zu den Umweltauswirkungen verschiedener STM-Rückgewinnungsmassnahmen im schweizerischen ELV-Managementsystem. Konkret werden zwei Fragen angesprochen: (i) welche automobilen EE-Geräte, die vorab ausgebaut und einer besonderen Folgebehandlung zugeführt würden, ergäben den größten Umweltnutzen? und (ii) wäre die Rückgewinnung von STM aus demontierten EE-Geräten aus ökologischer Sicht besser, als eine STM-Rückgewinnung aus SLF-Verbrennungsrückständen

Zur Beurteilung der erwünschten Erhöhung der STM-Rückgewinnung aus Altfahrzeugen mussten verschiedene Grundlagen geschaffen werden:

- Entwickeln von einheitlichen Modellen des ELV-Entsorgungssystems um
 - die für die vielfältigen Aufgaben geeigneten Methoden (MFA, LCA, SD, ...) durchgängig anwenden zu können
 - Systemoptimierungen vorzuschlagen
 - zukünftige Entwicklungen antizipieren zu können
- Entwickeln der entsprechenden "Werkzeuge" für die
 - Probenahmen und Probenaufbereitung (minimieren der Fehler / Unsicherheiten)
 - chemische Analytik für ELV Fraktionen, insbesondere für SLF
 - neue Inventare für die Ökobilanzierung


Die Arbeiten im EVA-Projekt wurden in Arbeitspaketen (AP) organisiert, welche in drei Strängen A, B, und C gruppiert waren. Die folgende Tabelle beschreibt die Inhalte der AP und der Farbcode deren Status: in Grün sind abgeschlossene, in Rot sind nicht begonnene und in Orange sind weiterzuführende Arbeitspakete.


Tabelle 1. Die Arbeitspakete des EVA Projektes mit einer Kurzbeschreibung


AP	Arbeitspaket	Kurzbeschreibung
A1	EAG existierender Ausbau	eine statistisch relevante Erhebung zum gegenwärtigen EAG Ausbau aus Altfahrzeugen
A2	EAG Entnahmetests	EAG-Entnahmetests für den Ausbau von Fokusgeräten
A3	EAG Entfrachtungstest	EAG-Entfrachtungstests grösserer Mengen von ELV (> 100 PWs)
A4	EAG Entsorgung (evtl. in EVA II)	Repräsentative Umfrage bei CH Garagisten etc. zum Austausch und Entsorgung von defekten WEEE sowie eine punktuelle STM Analyse von ausgewählten Komponenten (v.a. Magnete und PWB)
B1	RESH-Grossversuch I (neu !!)	Die entfrachteten PWs aus A3 werden in einem CH Werk geschreddert und die entnommenen SLF-Proben bei Empa und umtec aufbereitet.
B2	RESH Analyse	Die SLF Proben aus B1 werden bei Empa analysiert um den STM Gehalt in den Hauptbestandteilen von SLF (z.B. Fasern&Flusen, Sand&Staub, Folien&Bruchstücke) zu bestimmen.
B3	RESH-Grossversuch II (evtl. in EVA II)	Wiederholung des ursprünglich geplanten Versuchs B1 (RESH Schlackenbehandlung auf der neuen KEZO Anlage)
C1	MFA Modell	Ein hinreichend genaues Massenflussmodell der CH-Personenfhzflotte, insbesondere für die STM in den, im Entsorgungsteil, erzeugten Fraktionen
C2	Datenunsicherheit in MFA	eine fundierte Behandlung der Unsicherheiten und Fehler in der Auswertung und deren Minimierung in der Versuchsplanung
C3	Szenarien & Dynamik	eine (dynamische) Betrachtung (Modellierung / Szenarienbildung) der Lager und Flüsse (basierend auf C1 und C2)
C4	Ökobilanzen	Erheben der relevanten Prozesse (Ökoinventare) und deren Abbildung durch Ökobilanzierung
C5	Optimierung (wird in EVA II weiter entwickelt)	quantitative Abschätzung von System Optimierungen durch bessere Steuerung der Materialflüsse und zielgerichteter Aufbereitung der Fraktionen (basierend auf C3 und C4)
K	Koordnation & Berichten	fachliche Koordination der Aktivitäten: Plant die einzelnen Schritte, Synchronisiert den Wissensstand der Teilnehmer, Dokumentiert und Präsentiert Resultate.
V1	Liste Metalle & Geräte	Im Rahmen der Arbeitsgruppe "StandDerTechnik" werden die Abfolge der Entwürfe bzw. geltenden Listen von Geräten und Metallen verabschiedet.


zu B3: die ursprünglich geplante Verbrennung einer grösseren Menge RESH in der KEZO, Hinwil konnte nicht zeitgerecht durchgeführt werden, weil die Inbetriebnahme des neuartigen Behandlungsprozesses länger als ursprünglich geplant dauerte. Mittlerweile hat sich auch gezeigt, dass es schwierig sein wird, in einem solchen Versuch die Transferkoeffizienten für die vorgesehenen STMs mit der nötigen Genauigkeit bestimmen zu können. Daher wurde der RESH-Grossversuch II vertagt und wird nötigenfalls und mit entsprechenden Anpassungen in EVA II durchgeführt.

Haupt-		Nebengruppen										-gruppen						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
IA																	VIIIA	
1 (K)	1H																2He	
2 (L)	3Li	4Be											5B	6C	7N	8O	9F	10Ne
3 (M)	11Na	12Mg											13Al	14Si	15P	16S	17Cl	18Ar
4 (N)	19K	20Ca	III B	IV B	V B	V I B	V II B	V III		I B	I I B							
5 (O)	37Rb	38Sr	39Y	40Zr	41Nb	42Mo	43Tc	44Ru	45Rh	46Pd	47Ag	48Cd	49In	50Sn	51Sb	52Te	53I	54Xe
6 (P)	55Cs	56Ba	57La	72Hf	73Ta	74W	75Re	76Os	77Ir	78Pt	79Au	80Hg	81Tl	82Pb	83Bi	84Po	85At	86Rn
			58Ce	59Pr	60Nd	61Pm	62Sm	63Eu	64Gd	65Tb	66Dy	67Ho	68Er	69Tm	70Yb	71Lu		

 Kritisch nach EC (2017)

 EVA-Wunschliste

 Abgedeckt in den Arbeitspaketen B1, B2

 Abgedeckt in den Arbeitspaketen A1, C1, C3


 Abgedeckt im Arbeitspaket C4

Abbildung 1. Grafische Übersicht der STMs, die EVA in den verschiedenen APs untersucht hat

Die Auswahl an STMs in den verschiedenen Arbeitspaketen weicht von der anfänglichen "EVA-Wunschliste"¹ ab.

- B1, B2: Beschränkung auf achtzehn STMs aus Kostengründen und analytischen Herausforderungen. Einige IBMs und deren Legierungselemente wurden mit einbezogen (Al, Cr, Cu, Fe, Ni).
- A1, C1, C3: hauptsächlich aufgrund der kargen Datenverfügbarkeit zum STM-Gehalt in EE-Geräten beschränkten wir uns auf acht STMs. Die Auswahl ergab sich aus deren Relevanz in den beiden ausschlaggebenden EAG-Typen: Aktoren und Steuerungen.
- C4: gleiche Liste verwendet wie unter wie A1, C1, C3, hauptsächlich aufgrund der Datenverfügbarkeit in den Lebenszyklus-Inventaren sowohl der primären als auch der sekundären Produktionsprozesse und des Verbleibs in Recyclingsystemen. Einige IBM wurden mit einbezogen (Al, Cu, Fe).

¹EVA-Wunschliste (siehe auch Schlussbericht C2):

Alle 5 leichten Metalle der Seltenen Erden: Ce, La, Nd, Pr, Sm (5)

4 der 10 schweren Metalle der Seltenen Erden: Dy, Gd, Tb, Tm, Y (5)

alle Edelmetalle (ohne Os, Ir): Ru, Rh, Pd, Ag, Pt, Au (6)

weitere wichtige Metalle: Sb, Ga, Be, Co, Li, Sr, Te, Ti, Nb, Ta (10)

(Gesamt (26): Sb, Be, Ce, Co, Dy, Gd, Ga, Au, La, Li, Nd, Nb, Pd, Pt, Pr, Rh, Ru, Sm, Ag, Sr, Ta, Te, Tb, Ti, Y, Zr)

PhD Wunschliste (17): La, Pr, Nd, Sm, Tb, Dy, Pd, Pt, Ru, Rh, Ag, Au, Ta, Nb, Co, Ga, In

2 EVA: Fragen und Antworten

Die nachfolgenden Kapitel sind nach den Kernfragen, die EVA beantwortete, gegliedert:

1. Welche automobilen EE-Geräte sind die Hauptquellen von STMs? (A1)
2. Was sind die aktuellen Lagerbestände und Ströme von STMs in der schweizerischen Fahrzeugflotte? (C1)
3. Was sind die aktuellen STM-Massenanteile in der SLF? (B1, B2, C2)
4. Wie hoch ist die aktuelle Demontagequote von STM-reichen EE-Geräten? (A1, A3)
5. Was ist der (Zeit) Aufwand für die Demontage von STM-reichen EE-Geräten? (A2, A3)
6. Was sind die Einsparungen an Umweltbelastungen durch die Demontage von STM-reichen Geräten? (C4)
7. Welche EE-Geräte sollten demontiert werden, um den Umweltnutzen zu maximieren und den Demontageaufwand zu minimieren? (C5)
8. Was ist das zukünftige Potenzial für das automobilen EEG-Recycling? (C3)

2.1 Welche automobilen EE-Geräte sind die Hauptquellen von STMs?

Wir identifizierten die Hauptquellen von STMs in PKWs durch eine harmonisierte Klassierungsstruktur von Fahrzeugelektronik in Kombination mit der Analyse von vier verschiedenen Datenbanken, die Informationen über: i) die Anzahl und die technischen Spezifikationen der in die Schweiz importierten Fahrzeuge (d.h. im Einsatz und in ELVs) und ii) die standardmäßige Geräteausstattung dieser Fahrzeuge enthalten.

Diese Untersuchung wurde in der Zeitschrift *Environmental Science and Technology* unter dem Titel "Stocks, Flows and Distribution of Critical Metals in Embedded Electronics in Passenger Vehicles" 2017 veröffentlicht.[4] Die folgenden Absätze sind dieser Publikation entnommen.

Abbildung 2 zeigt die Gesamtzahl der elektronischen Kontrollsysteme (ECS) in schweizerischen Fahrzeugen, die im Jahr 2014 importiert, im Einsatz und in ELVs eingebaut waren. Insgesamt finden sich unter diesen ECS 29 EE-Geräte die STMs enthalten: 13 Aktoren, davon 12 mit Permanentmagneten und 16 Controller mit Leiterplatten. Unter diesen 29 häufig eingebetteten EE-Geräten haben wir festgestellt, dass Seltenerd-Elemente (REEs) in 7 Aktoren mit Permanentmagneten "konzentriert" sind: Generator, Anlasser, Lautsprecher, Servolenkungsmotor und Kühlerlüftermotor in alten konventionellen PKWs und der Antriebsmotor / Generator in Elektro- und Hybridfahrzeugen. Darüber hinaus enthalten eine Vielzahl von mittelgroßen Elektromotoren wie der Drosselklappenantrieb und der hydraulische Modulator ebenfalls REE. Bei den Edelmetallen (PMs) enthalten die elektrische Sicherungs- und Verteilerbox, die ICE-Motor-/ Elektromotor-Steuerung und das Unterhaltungselektronikgerät den größten Teil der PM-Masse in einem Fahrzeug. Die Massenverteilung der STMs auf diese 29 EE-Geräte ist in Abbildung 3 dargestellt. Die EE-Geräte, die die Hauptquellen von STMs in jedem Fahrzeugtyp sind, sind in dunkleren Farben dargestellt.

Da sich nach den Ergebnissen in Abbildung 3 die Massenverteilung von STMs im Laufe der Zeit ändert, sollte die gemäss VREG-Revision zu veröffentlichende Geräteliste auch die Hauptquellen von STMs in neuen Fahrzeugtypen enthalten, beispielsweise den Antriebsmotor/Generator und die Batterie in Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Es ist daher notwendig, die Versuche dieser Studie auch auf neue Fahrzeugtypen auszudehnen und die Demontagequoten und die entsprechenden Demontagezeiten neuerer STM-haltiger EE-Geräte abzuschätzen.

Highlights

- Unter den mehr als 300 eingebetteten EE-Geräten in PKWs sind:
 - Dy, La, Nd und Co in sieben Geräten mit Permanentmagneten konzentriert: Generator, Anlasser, Lautsprecher, Servolenkungsmotor, Kühlerlüftermotor und Antriebsmotor/Generator in Elektro- und Hybridfahrzeugen.
 - Die Edelmetalle Ag, Au, Pd und Ru sind in 3 Leiterplatten-haltigen Geräten konzentriert: der Sicherungs- und Verteilerbox, der ICE- / Elektro-Motor-Steuerung und dem Unterhaltungselektronik (UE)-System.
- Die Massenverteilung von STMs ändert sich mit der Zeit. Daher ist es notwendig, die Forschung auf neue Geräte in neuen Fahrzeugtypen auszuweiten.

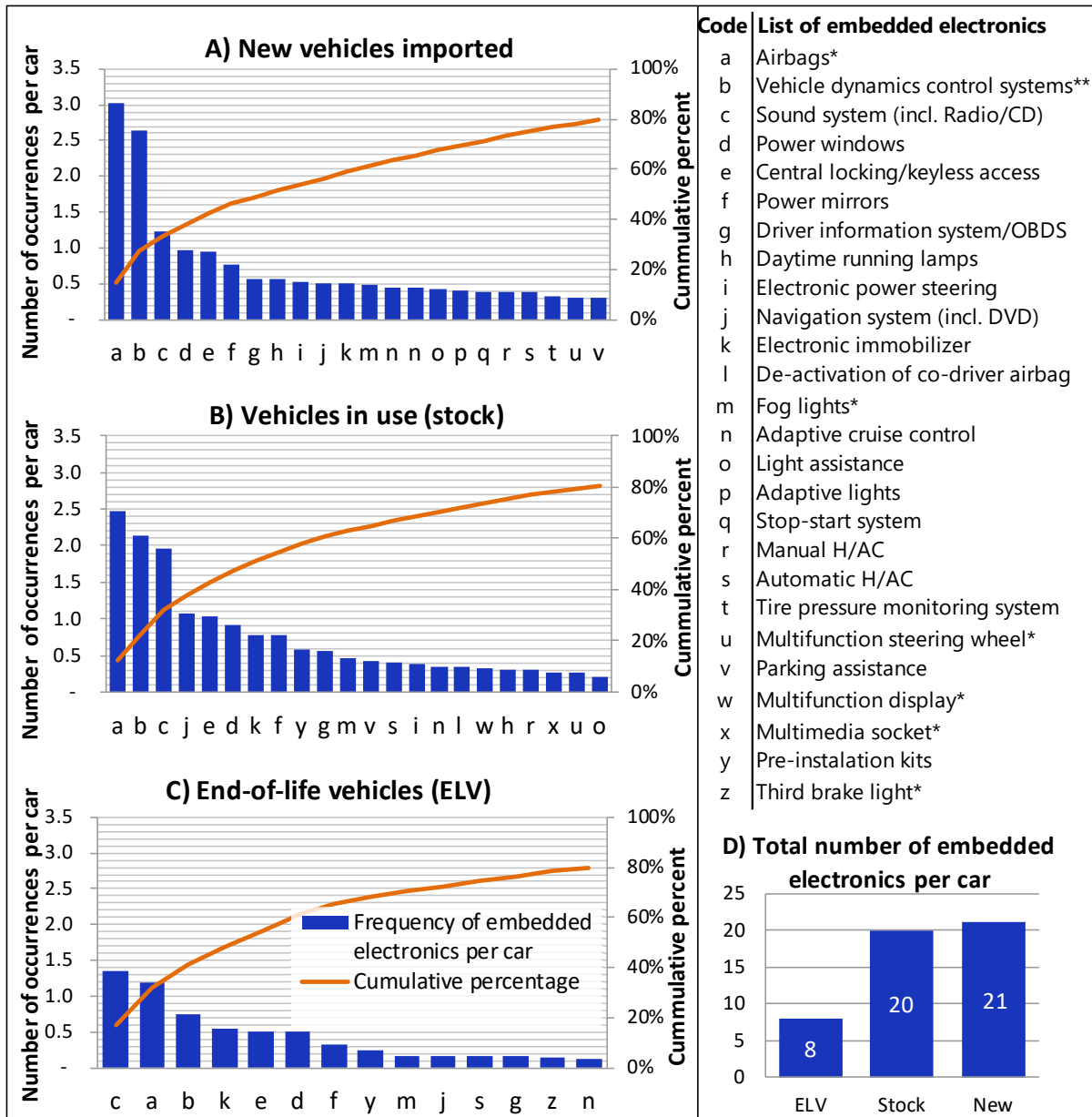


Abbildung 2. Häufigkeit eingebetteter EEG in den Fahrzeugströmen im Jahr 2014: (A) der importierten Neufahrzeuge, (B) dem Bestand der Fahrzeugflotte und (C) der ELV. D) zeigt die Gesamtzahl der eingebetteten EEG pro Fahrzeug in den entsprechenden Beständen und Strömen. In den Grafiken A) bis C) stellen die blauen Balken die Anzahl der EEG pro Fahrzeug im Bestand und den betrachteten Strömen dar; der Wert wird auf der linken Achse angezeigt. Der kumulierte Prozentsatz dieser Anzahl an EEG bezogen auf die Gesamtzahl pro Fahrzeug wird durch die orangefarbene Linie dargestellt; der Wert wird auf der rechten Achse angezeigt.

*: EE-Geräte. **: Fahrdynamikregelsysteme, einschließlich ABS, ESP, EBD, HHC, DSR, TCS und CBC.

All values in percentages

Selected electric and electronic devices		Distribution of critical metal mass in passenger vehicles - in percentage (%)																								
		A) Average new vehicle (cohort 2014)								B) Average vehicle in stock (cohort 2007)								C) Average ELV (cohort 2000)								
		Ag	Au	Pd	Ru	Dy	La	Nd	Co	Ag	Au	Pd	Ru	Dy	La	Nd	Co	Ag	Au	Pd	Ru	Dy	La	Nd	Co	
Actuators	Permanent magnets	Speakers (only woofer)					0.002	0.2	0.01	0.1					0.01	0.2	0.03	0.1					0.1	0.2	0.1	0.2
		Throttle actuator					0.001	0.05	0.003	0.02					0.002	0.1	0.01	0.03					0.03	0.1	0.04	0.1
		Hydraulic modulator					0.001	0.04	0.003	0.02					0.002	0.1	0.01	0.03					0.03	0.1	0.03	0.1
		Power windows motors					0.001	0.1	0.005	0.03					0.002	0.1	0.01	0.03					0.01	0.02	0.0	0.02
		Radiator fan motor					0.001	0.1	0.01	0.04					0.004	0.1	0.01	0.1					0.1	0.1	0.1	0.1
		Electronic power steering motor					0.1		0.4	0.5					0.2		0.4	0.4					0.3		0.2	0.1
		Windscreen wiper motor					0.0004	0.03	0.002	0.01					0.001	0.03	0.005	0.02					0.02	0.04	0.02	0.04
		Windscreen wiper fluid pump					0.0001	0.004	0.0003	0.001					0.000	0.005	0.001	0.003					0.002	0.01	0.003	0.01
		Alternator					0.002	0.2	0.01	0.1					0.01	0.2	0.03	0.1					0.1	0.3	0.1	0.3
		Starter motor					0.001	0.1	0.01	0.04					0.004	0.1	0.02	0.1					0.1	0.1	0.1	0.1
		Drive motor/Generator hybrid vehicle					0.6		0.3	0.2					0.6		0.2	0.1					0.1		0.1	0.02
		Drive motor/Generator electric vehicle					0.2		0.1	0.1					0.1		0.04	0.01					0.01		0.001	0.0002
		NiMH Battery					0.0005	0.3	0.2						0.001	0.1	0.1						0.0002	0.005	0.02	
Controllers	Printed Circuit Boards	Airbag controller	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00002	0.00004	0.00005	0.0002	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00005	0.0001	0.0001	0.0003	0.1	0.1	0.1	0.1	0.001	0.0001	0.001	0.001
		ABS/ESP/EBD/VDC/HHC/DSR/TCS/CBC contro.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0004	0.0001	0.01	0.0005	0.1	0.1	0.1	0.1	0.001	0.0001	0.008	0.001	0.03	0.03	0.03	0.03	0.004	0.00003	0.01	0.0003
		Sound system controller (incl. Radio/CD)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0001	0.003	0.003	0.001	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0005	0.005	0.010	0.003	0.2	0.2	0.2	0.2	0.003	0.003	0.02	0.002
		Navigation System controller (incl. DVD)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0004	0.0001	0.01	0.001	0.2	0.2	0.2	0.2	0.002	0.0002	0.02	0.001	0.03	0.03	0.03	0.03	0.004	0.00004	0.01	0.0004
		Central locking/Keyless access controller	0.02	0.02	0.02	0.02	0.000003	0.00002	0.00002	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00001	0.00002	0.000	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0001	0.00001	0.000	0.0001
		Power windows controller	0.02	0.02	0.02	0.02	0.0001	0.00002	0.001	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0002	0.00002	0.002	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001	0.00001	0.005	0.0001
		Power mirrors controller	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.000000005	0.00000002	0.00000002	0.000002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.00000001	0.00000002	0.00000004	0.000003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.000002
		Light assistance system controller	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.000001	0.0000002	0.00001	0.0000	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.000001	0.0000001	0.00001	0.000001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.000001	0.00000001	0.000002	0.00000001
		Electronic power steering controller	0.1	0.1	0.1	0.1		0.00002	0.00002	0.001	0.05	0.05	0.05	0.05		0.00001	0.00003	0.0004	0.01	0.01	0.01	0.01		0.00002	0.00001	0.0001
		Parking assistance controller	0.02	0.02	0.02	0.02	0.0001	0.00002	0.001	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0002	0.00002	0.002	0.0001	0.004	0.004	0.004	0.004	0.001	0.000004	0.002	0.00004
		Automatic H/AC controller	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00004	0.00001	0.001	0.00005	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0001	0.00001	0.001	0.0001	0.003	0.003	0.003	0.003	0.0005	0.000004	0.002	0.00004
		Adaptive cruise control (ACC) controller	0.02	0.02	0.02	0.02	0.0001	0.00002	0.001	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0001	0.00001	0.001	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001	0.00001	0.002	0.0001
		Engine/Motor controller	0.1	0.1	0.1	0.1	0.001	0.00001	0.00001	0.001	0.1	0.1	0.1	0.1	0.005	0.00001	0.00002	0.001	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.00001	0.0001	0.003
		Daytime running lamps controller	0.02	0.02	0.02	0.02	0.0001	0.00002	0.001	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0001	0.00001	0.001	0.0001	0.003	0.003	0.003	0.003	0.0004	0.000004	0.001	0.00004
		Dashboard	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0003	0.0001	0.005	0.0004	0.1	0.1	0.1	0.1	0.001	0.0001	0.01	0.001	0.1	0.1	0.1	0.1	0.02	0.0001	0.1	0.001
Electrical system controller	0.2	0.2	0.2	0.2	0.001	0.0002	0.01	0.001	0.2	0.2	0.2	0.2	0.003	0.0003	0.03	0.002	0.3	0.3	0.3	0.3	0.04	0.0003	0.1	0.003		
Total mass per average vehicle (in g)		1	0.3	0.06	0.001	5	40	40	50	1	0.3	0.06	0.001	2	30	20	30	1	0.2	0.03	0.001	0.1	30	3	20	
Mass share (%)																										

Abbildung 3. Verteilung der STM-Masse in EE-Geräten in durchschnittlichen Fahrzeugen (A) Neufahrzeuge und (B) Fahrzeuge in der Flotte und (C) ELVs. Die Tabelle zeigt in den Spalten für jedes Element entsprechend der Farbskala den Massenanteil (in Prozent) in einem bestimmten EE-Gerät pro durchschnittliches

Fahrzeug. Zum Beispiel in einem durchschnittlichen ELV, ist La vor allem in der Lichtmaschine vorhanden, während es in einem durchschnittlichen neuen Hybrid-Fahrzeug (HEV) vor allem in der NiMH-Batterie vorkommt.

2.2 Was sind die aktuellen Lagerbestände und Ströme von STMs in der schweizerischen Fahrzeugflotte?

Die Lagerbestände und Ströme von STMs im schweizerischen Fhz-Managementsystem wurden mittels einer geschachtelten Materialflussanalyse (layered MFA) [5], [6] unter Berücksichtigung der folgenden Stufen berechnet: PKW, Fahrzeugsubsysteme² (namentlich das elektrische und elektronische Subsystem) elektronische Steuerungssysteme (ECS), elektrische und elektronische (EE) Geräte, EE-Bauteile, EE-Komponenten und STMs. Wir haben datentechnische Unsicherheiten auf allen betrachteten Stufen durch eine Monte-Carlo-Simulation³ berücksichtigt. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse wurden 2017 in der Zeitschrift Environmental Science and Technology unter dem Titel "Stocks, Flows and Distribution of Critical Metals in Embedded Electronics in Passenger Vehicles" veröffentlicht. Die folgenden Absätze sind dieser Veröffentlichung entnommen.

Alle Ergebnisse werden als Median \pm 97,5 und 2,5 Perzentil der Monte-Carlo-Simulation angegeben; dies entspricht einem Konfidenzintervall von 95%. Unsicherheiten werden auf eine signifikante Stelle gerundet und Medianwerte auf die Genauigkeit der Unsicherheit gerundet; (-) gibt einen Wert gleich Null an. Die Ergebnisse werden für das Jahr 2014. Ein Gigagramm entspricht tausend Tonnen.

Abbildung 4 stellt die Ergebnisse der MFA in Bezug auf die gesamte Materialmasse im Jahr 2014 dar. Der ELV-Strom („ELV“ in Abbildung 4) ist vergleichbar mit den insgesamt 130 Gg der in der Schweiz im Jahr 2014 behandelten Elektro- und Elektronik-Altgeräte. [7]

Abbildung 5A und 5B zeigen die berechnete STM-Masse der pro Fahrzeug (Balkenhöhe) und die Anzahl der Fahrzeuge (Balkenbreite) im Bestand, Import- und ELV-Strom im Jahr 2014; die Fläche der Balken stellt die Gesamtmasse der STMs im entsprechenden Fhz-Bestand oder Strom dar. Die Gesamtmassen der STMs waren mehr als 5-mal höher in den Fhz-Importen als im ELV-Strom, zum Beispiel berechneten wir 25 ± 8 t/a Seltenerdelemente (REE: Dy, La, Nd und Co) in Neufahrzeugen, verglichen mit 3 ± 1 t/a REE in ELVs. Etwa die Hälfte des Massenzuwachses ist auf eine größere Anzahl von Fahrzeugen zurückzuführen (3-mal größer im Import- als im ELV-Strom), während die andere Hälfte auf eine höhere STM-Masse pro Fahrzeug im Importfluss zurückzuführen ist (Abbildung 5B). Es ist daher zu erwarten, dass die STM-Masse im ELV-Fluss in den kommenden 15 bis 20 Jahren um den Faktor 2 zunimmt (Durchschnittsalter eines ELV).

Vergleicht man (für 2014) den Bestand an Elektro- und Elektronikgeräten (EEG) der Kategorien 3 und 4 (IT- und Telekommunikationsgeräte bzw. Unterhaltungselektronik), so ist das STM-Lager in der schweizerischen PKW-Flotte bedeutend, z.B. für Nd berechnen wir 70 ± 30 t in der Fhz-Flotte im Vergleich zu ~ 60 t in den schweizerischen Haushalten und Büros (Böni et al. 2010) [8] und für Au als Beispiel für PMs ist der Lagerbestand in der Fhz-Flotte etwa ein Fünftel der dessen der Haushalte und Büros [9].

Auch wenn der derzeitige STM-Strom in ELV insgesamt viel geringer ist als in den EAG-Kategorien 3 und 4, [9] dürften diese Mengen in Zukunft deutlich ansteigen, da: i) gegenwärtig in Neuwagen deutlich mehr EEG verbaut sind als in Altfahrzeugen (Tendenz steigend) und / oder ii) neue automobile EEGs, die mehr und z.T. grössere Mengen an STM enthalten.

² Ein Auto ist ein System bestehend aus mehreren Subsystemen; beispielsweise dem elektrischen und elektronischen-, dem Antriebsstrang- oder dem Kraftstoff-Subsystem.

³ Monte-Carlo-Simulation oder Wahrscheinlichkeitssimulation ist in diesem Zusammenhang eine Technik, die verwendet wird, um den Einfluss von Unsicherheiten in den berechneten Variablen zu verstehen. Beispielsweise, bei der Abschätzung der Masse von ELVs werden bei der Monte-Carlo-Simulation viele mögliche Ergebnisse unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Berechnungsparameter bewertet. Als Ergebnis erhalten wir einen Wert für die durchschnittliche Masse der ELVs und zusätzlich die zugehörige Unsicherheit.

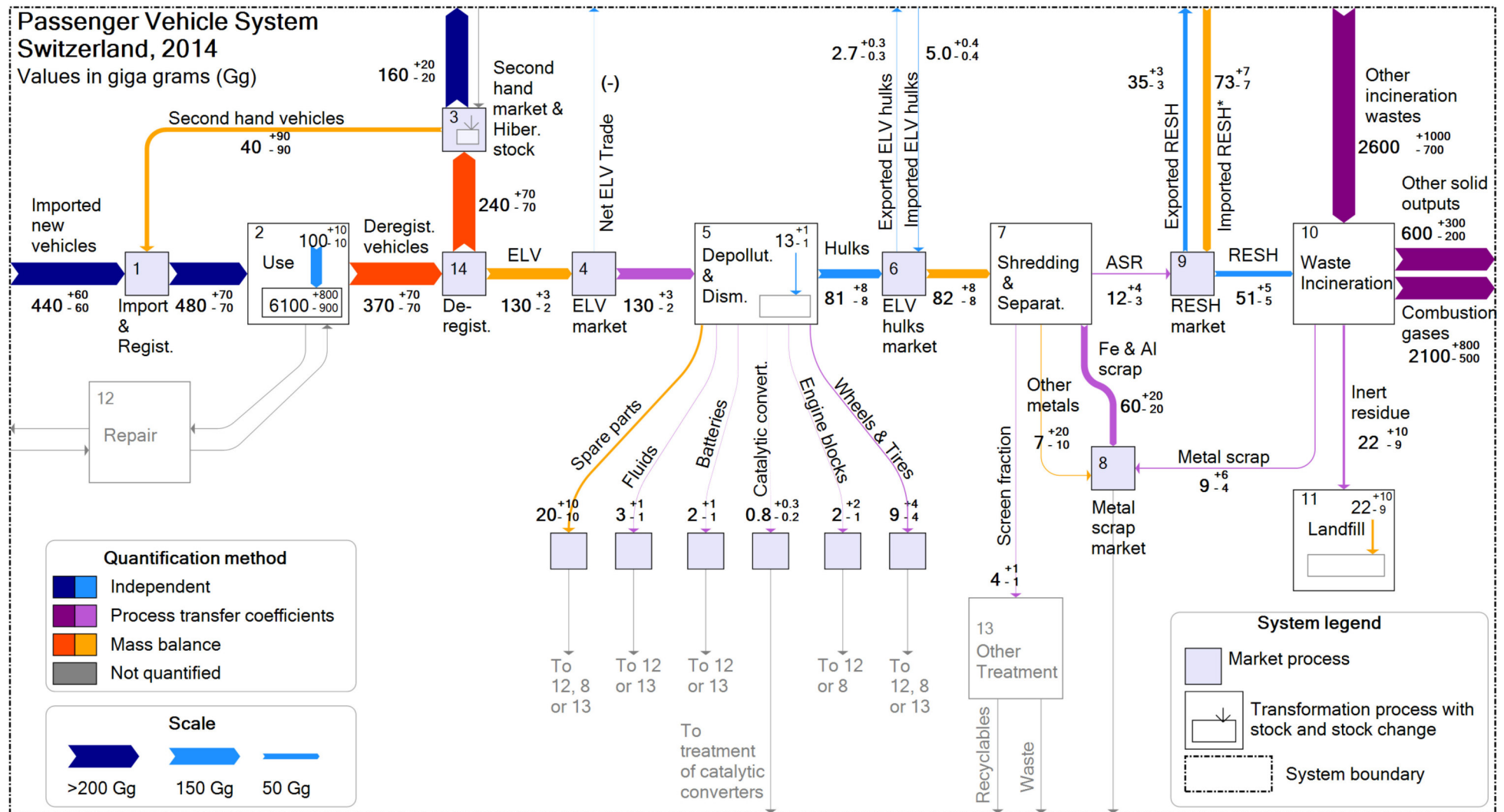


Abbildung 4. System der PKW-Massenflüsse der Schweiz, 2014. Materialstufe: PKW und Ausgangsfraktionen der ELV-Behandlung. Die Pfeilbreite bleibt ab 200 Gg gleich; dunkle Farben zeigen Werte größer als 200 Gg, helle Farben zeigen Werte kleiner oder gleich 200 Gg an. "Andere Metalle" aus "Shreddern & Trennen" sind Teile von elektrischen Maschinen. RESH: Mischung aus PKW-RESH und nichtautomobilem RESH. Zum importierten RESH gehören RESH aus anderen Ländern sowie nichtautomobiler RESH aus der Schweiz und anderen Ländern.

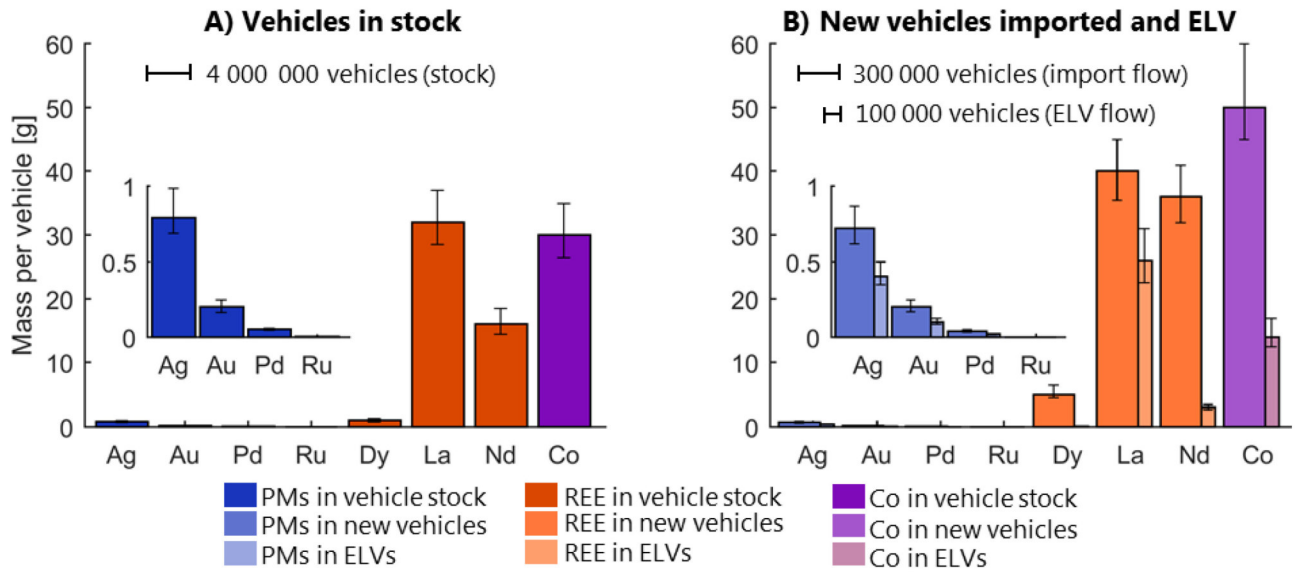
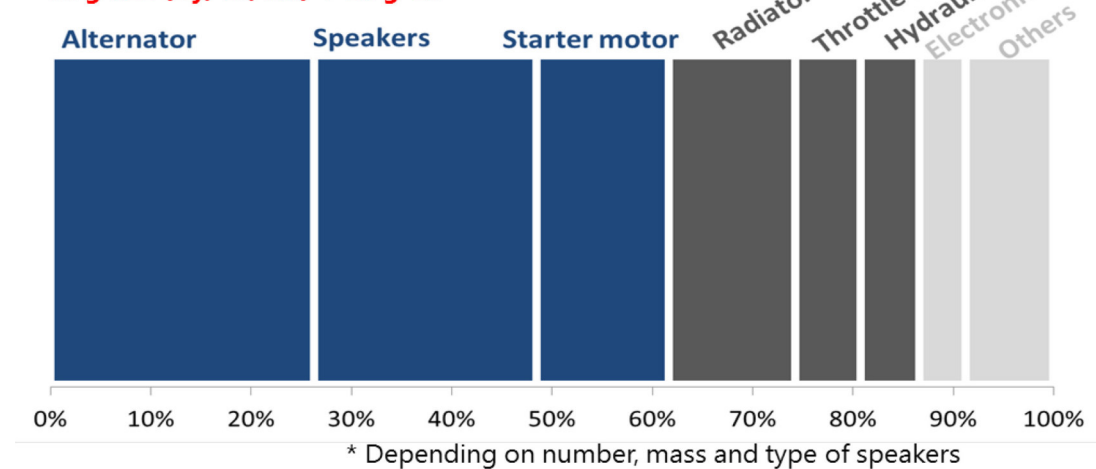


Abbildung 5. A) STM Lagerbestände und B) Ströme in schweizerischen PKWs, 2014. Die Breite der Balken ist proportional zur Anzahl der Fahrzeuge (z. B. ist in Abbildung 5B die Breite der Balken für die importierten Fahrzeuge breiter als die der ELVs, um zu symbolisieren, dass im Vergleich zu 100 ELV, 300 Fahrzeuge importiert werden). Der gesamte STM-Bestand oder -Strom kann durch Multiplikation der Breite mit der Höhe berechnet werden. Die Fehlerbalken zeigen 97,5 Median und 2,5. Perzentil der Monte-Carlo-Simulation an; dies entspricht einem Konfidenzintervall von 95%. Die Werte werden auf eine signifikante Stelle gerundet.

A) Total mass in an average ELV cohort 2000 (18 years old):
33 g REE (Dy, La, Nd) + 20 g Co



B) Total mass in an average ELV of cohort 2000 (18 years old):
0.8 g PMs (Ag, Au, Pd, Ru)

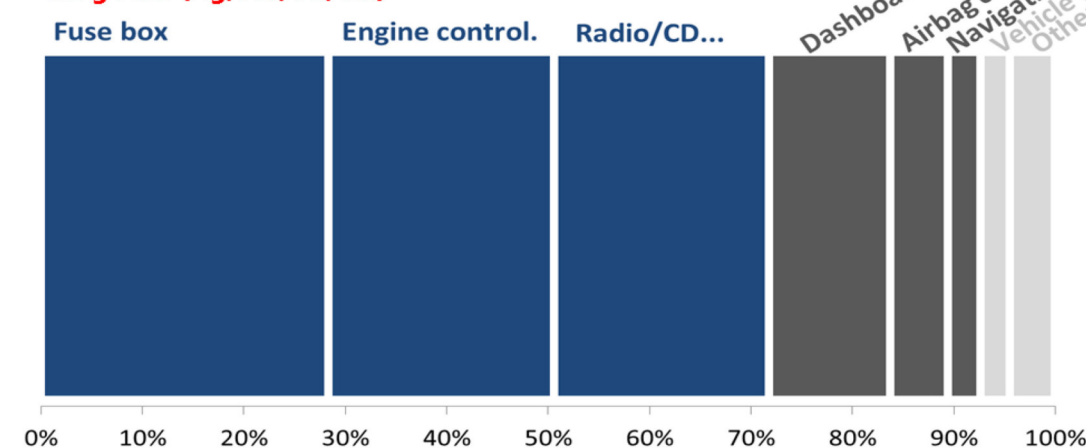


Abbildung 6. Die STM-Masse in einem durchschnittlichen ELV der Kohorte 2000 (18 Jahre alt). Etwa 80% der untersuchten STM-Massen finden sich in der Lichtmaschine, den Lautsprechern, dem Anlasser, der Verteil-/Sicherungsbox, dem Motorsteuergerät und der UE-Konsole (Radio, ...).

- Highlights**
- Das schweizerische STM-Lager in automobilen EEG war 2014 für einige Metalle z.B. Nd (70_{-20}^{+30} t) vergleichbar mit dem STM-Lager in IKT-Geräten in Haushalten und Büros (~60 t).
 - Der STM-Strom in importierten Neufahrzeugen war 2014 fünfmal größer als der in ELVs; je aufgrund von 50% mehr eingebetteten EEG und von größeren STM-Massen in modernen EEG.
 - Die Gesamtmassenbilanz in den ELV-Behandlungsprozessen ist einigermaßen ausgeglichen. Berechnete grosse STM-Ströme in der ELV-Behandlung, wie z.B. der von Ersatzteilen, bleiben jedoch sehr ungenau.

2.3 Was sind die aktuellen STM-Massenanteile in der SLF?



Um die Zusammensetzung des SLF zu untersuchen, wurden zwei Tests mit Chargen von in verschiedenen Jahren hergestellten ELVs durchgeführt: eine Charge von 67 "älteren" ELVs aus dem Jahr 2000 oder früher und eine Charge von 63 "neueren" ELVs aus dem Jahr 2001 oder später. Die beiden Chargen wurden getrennt zerkleinert und ein Satz von Proben aus den Ausgängen der SLF entnommen. Diese Proben wurden aufbereitet auf 17 STMs und analysiert.

Die gemessenen Massenanteile der 17 ausgewählten STM sind in Abbildung 7 dargestellt. Bei Pb, Cr, Ni, Dy, Cd und Pt wurde ein deutlicher Unterschied zwischen der "älteren" und der "neueren" Probe festgestellt, wobei in der "neueren" Probe ein höherer Massenanteil und bei Al, Sb und Sn ein geringerer Massenanteil angezeigt wurde. Es ist jedoch zu beachten, dass die durch die Fehlerbalken angezeigten Unsicherheiten nur den Beitrag der chemischen Analyse beinhalten. Die tatsächlichen Unsicherheiten, einschließlich des Beitrags von Probenahme und Probenvorbereitung, sind höher. Trotz dieser Unsicherheiten scheint es in der "neueren" Probe eine gewisse Tendenz zu geben, dass die STM-Massenanteile höher sind: Alle 7 STM (Co, Nd, La, Pd, Dy, Au und Pt) wurden in der "neueren" Probe mit etwas höheren Werten gemessen. Eine mögliche Erklärung ist, dass die neueren ELVs größere Mengen an Elektronik enthalten. Dies wurde auch durch Beobachtungen eines größeren Massenanteils der Leiterplatten im SLF von neueren ELVs (0,22%) als von älteren ELVs (0,13%) angezeigt.

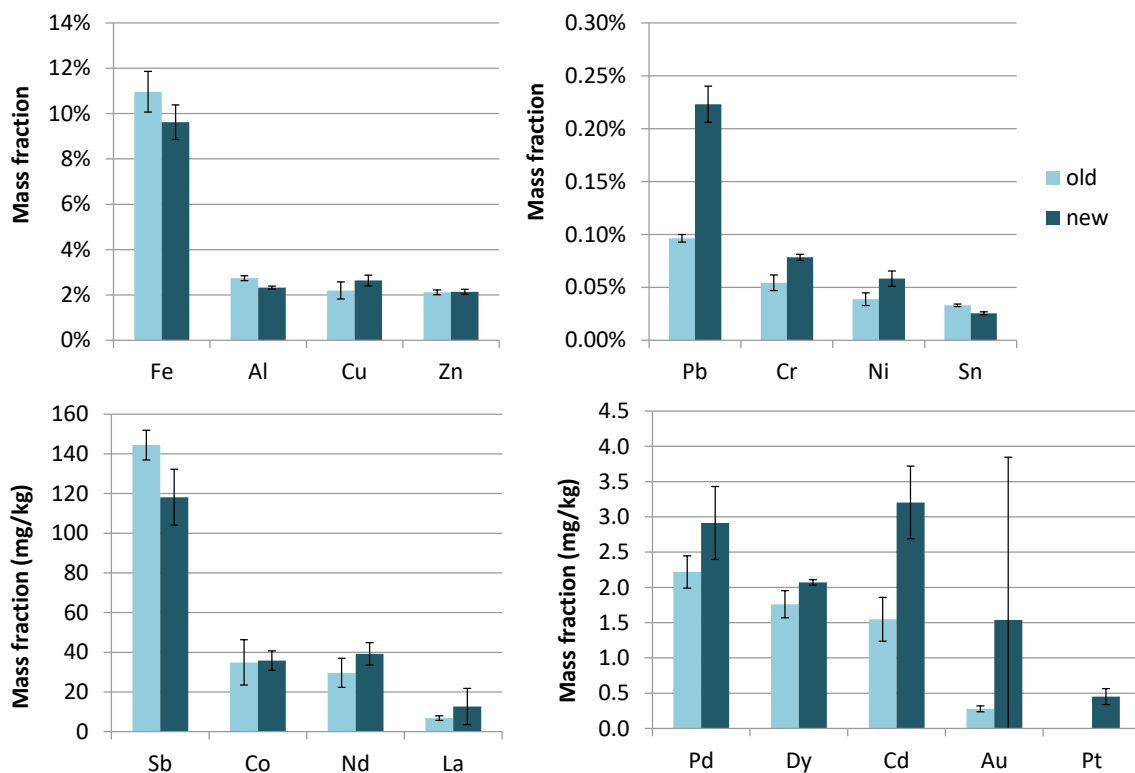


Abbildung 7 Gemessene Massenanteile von Elementen in den Großproben der SLF von älteren ELVs (vor 2001 hergestellt) und neueren Altfahrzeugen (2001 oder später hergestellt). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung von 5 wiederholten Aufschlüssen und Messungen der chemischen Analyse an und beinhalten keine Unsicherheiten durch Probenahme oder Probenvorbereitung.

Um die STM-Verteilung in der SLF zu untersuchen, wurden einige Proben vor der chemischen Analyse weiter in eine feine ($\leq 0,5$ mm) und eine grobe ($> 0,5$ mm) Fraktion getrennt. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 8. Die meisten STMs (Co, La, Nd, Dy, Pd, Pt) wurden mit höheren Massenanteilen in der Feinfraktion gefunden. Da der Massenanteil der Feinfraktion jedoch lediglich etwa 8-10% der SLF ausmachte, war der Großteil der STM-Masse bei den meisten STMs trotzdem in der Grobfraktion zu finden. Außerdem können die Massenanteile in der Grobfraktion bei einigen Elementen unterschätzt sein, da größere Metallteile, die nicht ausreichend zerkleinert werden konnten, verworfen werden.

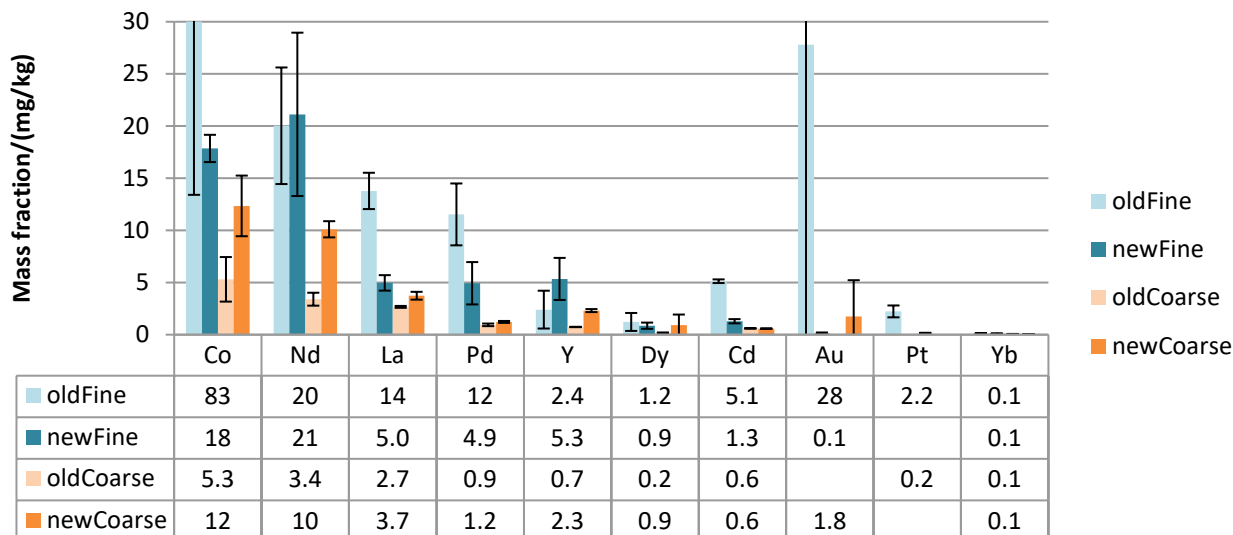


Abbildung 8: Geschätzte Massenanteile von STMs : Co, Nd, La, Pd, Y, Dy, Cd, Au, Pt, Yb in Fein- (<0,5mm) und Grobfraction (>0,5mm ohne große Metallteile). Es ist zu beachten, dass die Werte für Cd aufgrund der Pyrolyse während der Probenvorbereitung wahrscheinlich unterschätzt werden.

Die Studie veranschaulichte einige der vielen Herausforderungen bei der Bestimmung von STM-Massenanteilen im Verdünnungsbereich eines Millionstel zudem in einem ausserordentlich heterogenen Abfall wie SLF. Durch Aufstocken der Proben ("spiking" mit nicht vorkommenden SMTs) vor der Probenvorbereitung konnte gezeigt werden, dass in diesem entscheidenden Schritt erhebliche systematische Abweichungen auftreten können. Darüber hinaus führt das Auftreten bestimmter STMs in Nuggetform zu einer großen Variabilität zwischen den einzelnen Messungen und damit zu hohen Unsicherheiten. Dies gilt insbesondere für Au, wo einzelne Messungen derselben Probe um mehrere Größenordnungen variierten. Daher besteht ein klarer Bedarf an weiterer Validierung des gesamten Messprozesses, einschließlich Probenahme, Probenvorbereitung und chemischer Analyse. Vor allem werden mehr Daten benötigt, um eine robuste statistische Analyse zu ermöglichen, z.B. zur Berechnung der Variabilität und Unsicherheit aufgrund von Primärstichproben. Um einen Vergleich zwischen verschiedenen Studien zu ermöglichen, sollte es das Ziel der zukünftigen Forschung sein, auf ein standardisiertes Verfahren zur Messung von STMs und anderen Spurenmetallen in der SLF hinzuarbeiten. Letztlich sind solche Entwicklungen notwendig, um die Toxizität, die Umweltauswirkungen und das Potenzial zur Rückgewinnung von STMs aus der SLF in Zukunft zuverlässig beurteilen zu können.

Highlights	<ul style="list-style-type: none"> • Für STMs (Au, Co, Dy, La, Nd, Pd, Pd, Pt) wurden in der SLF Massenanteile von weniger als 1 mg/kg bis 40 mg/kg gemessen. • Basismetalle wurden mit Massenanteilen von 10-11% (Fe) und 2-3% (Al, Cu, Zn) gefunden. • Der Unterschied in der Zusammensetzung der SLF zwischen älteren und neueren ELVs ist für die meisten Elemente gering. Es gibt jedoch einige Anzeichen dafür, dass die STM-Massenanteile in der SLF von neueren Fahrzeugen etwas höher sind, obwohl aus diesen EEG viel häufiger entnommen werden. • Alle Elemente außer Sb wurden mit höheren Massenanteilen in den Fein- (<0,5 mm) gegenüber der Grobanteilen der SLF gefunden. Der Großteil der STM-Masse befindet sich jedoch aufgrund der größeren Menge im Grobanteil. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Gold in der SLF hauptsächlich als Nuggets vorkommt.
------------	--

2.4 Wie hoch ist die aktuelle Demontagequote von STM-reichen EE-Geräten?

Die Demontagequote ausgewählter EE-Geräte wurde in einem Experiment mit insgesamt 129 von VASSO-Mitgliedern demontierten Altfahrzeugen ermittelt. Die Art und Anzahl der demontierten Teile wurde durch den Versuch nicht festgelegt; somit entsprechen die ermittelten, pro ELV demontierten Teile den normalen Betriebsbedingungen. Die Anzahl der ursprünglich in den ELVs eingebetteten EE-Geräte wurde mit Hilfe der Autohandel-Datenbank abgeschätzt. Die Zerlegungsrate wird berechnet, indem die Anzahl der, während des Experiments zerlegten Geräte, D_d^{ELV} durch die geschätzte Anzahl der eingebetteten Geräte E_d^{ELV} dividiert wird. Gleichung 1

$$r_d^{ELV} = \frac{D_d^{ELV}}{E_d^{ELV}} \quad \text{Gleichung 1}$$

Abbildung 9 zeigt die Zerlegerate von EE-Geräten von höherer zu niedrigerer Zerlegerate. Es wurde festgestellt, dass die EEG mit höherer Demontagequote eher in hochwertigen Fahrzeugmodellen zu finden sind wie z.B. der Schiebedachmotor der Mercedes-Benz E-Klasse. Auch haben wir festgestellt, dass EEG mit Elektromotoren eine höhere Demontagequote haben als EEG mit Leiterplatten (PWBs). Neben vier Elektromotoren (Schiebedachmotor, hydraulischer Servolenkungsmotor, Klimaventilatormotor und Lichtmaschine) hatten die meisten EE-Geräte eine Demontagequote von weniger als 50%. Somit besteht die Möglichkeit, die Demontagequote solcher EE-Geräten zu erhöhen. Da die grosse Mehrheit der Schweizer Autoverwerter nicht dieselbe systematische EEG-Demontage wie die VASSO-Mitglieder durchführt, besteht voraussichtlich ein noch deutlich grösseres Potenzial zur Verbesserung der Demontagequote von EEG.

Unter dem Fahrzeugalter, der Fahrzeugklasse und der Demontagezeit von EE-Geräten wurde die Fahrzeugklasse als der relevanteste Faktor für eine hohe Demontagequote von EE-Geräten ermittelt. Die Fahrzeugklasse kann daher als Indikator für den Marktwert von gebrauchten Ersatzteilen verstanden werden. Das Fahrzeugalter und die Ausbaizeit scheinen wenig Einfluss auf die Demontagequote von EE-Geräten zu haben.

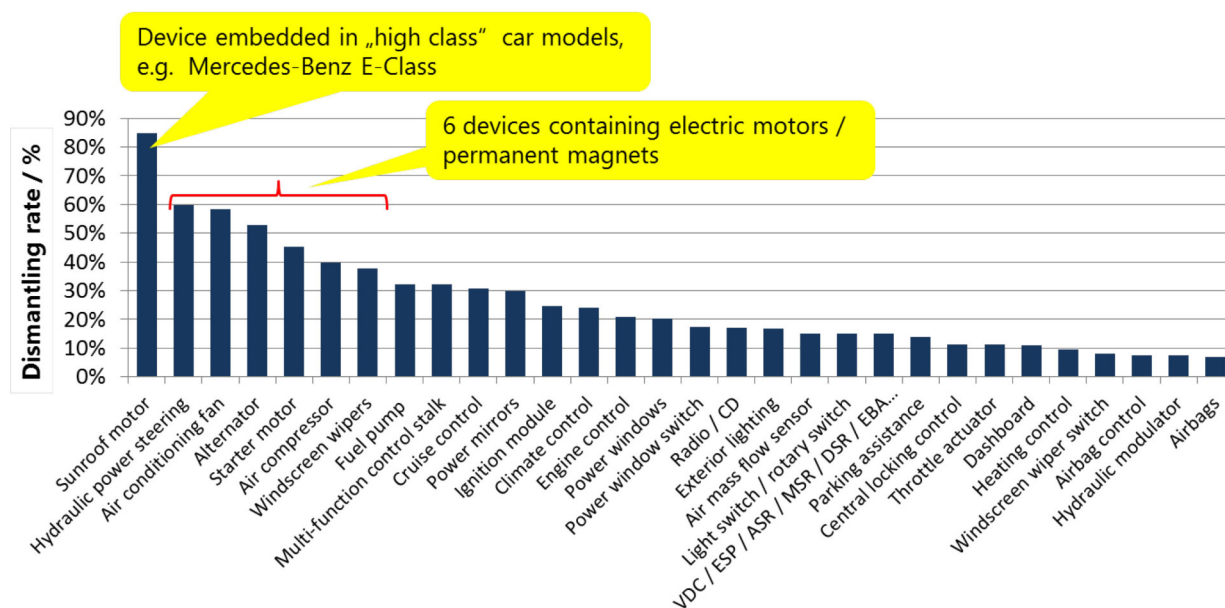


Abbildung 9. Zerlegungsrate von automobilen EEG.

Highlights	<ul style="list-style-type: none">• Die meisten EE-Geräte haben Demontagequoten von weniger als 50%. Und da die meisten Schweizer Autoverwertungsbetriebe keine systematische Demontage wie VASSO-Mitglieder durchführen, besteht ein grosses Potenzial zur Verbesserung des EEG Ausbaus.• Die Fahrzeugklasse scheint der wichtigste Faktor für die Demontagequote von EE-Geräten zu sein.• EE-Geräte mit Elektromotoren haben eine höhere Zerlegungsrate als Geräte mit PWBs. Somit ist das Potenzial zur Aufkonzentration von Permanentmagneten für eine spätere Rückgewinnung von REE kleiner als dasjenige von PWBs für eine spätere Rückgewinnung von PMs.
------------	---

2.5 Was ist der (Zeit)Aufwand für die Demontage von STM-reichen EE-Geräten?

Die Demontagezeit ausgewählter EE-Geräte wurde durch ein Experiment mit 19 von VASSO-Mitgliedern demontierten ELVs ermittelt. Die untersuchten EE-Geräte wurden von Vertretern von SARS, VASSO und Empa unter Berücksichtigung der folgenden 3 Aspekte ausgewählt: i) Masse der STMs in den Geräten, ii) geschätzter (erfahrungsgemäßer) Demontageaufwand der Geräte und iii) Kosten des gesamten Demontageversuchs. Insgesamt wurden dann 12 EE-Fokusgeräte ausgewählt, 6 Geräte mit REE und 6 Geräte mit PMs.

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse des Demontageversuchs. Für die Fälle, in denen Daten zur Verfügung standen, war die geschätzte Ausbauezeit in der Regel höher als die, während des Versuchs gemessene Abbauezeit. Insgesamt dauerte es durchschnittlich 188,03 Minuten pro ELV (ca. 3,13 Stunden), bis alle im Experiment berücksichtigten EE-Geräte demontiert waren. Die Geräte, die die längste Zeit in Anspruch nahmen, waren der Generator (Lichtmaschine) und der Anlasser mit durchschnittlich 21,78 bzw. 25,64 Minuten Abbauezeit. Die kürzeste Demontagezeit (durchschnittlich 6,13 Minuten) benötigte das Multifunktionsdisplay, gefolgt von den Scheibenwischermotoren (durchschnittlich 8,8 Minuten) und dem Radio/CD (durchschnittlich 9 Minuten). Allerdings gab es große Unterschiede in der Abbauezeit zwischen den Demontagebetrieben und den Fahrzeugen (Mindest- und Höchstzeiten unterscheiden sich stark von der Durchschnittszeit). Um die Robustheit dieser Ergebnisse zu verbessern, sollte das Experiment daher mit einer größeren Stichprobe von ELVs wiederholt werden.

Tabelle 2. Durchschnittliche Zerlegezeit in Minuten der ausgewählten EEG.

	Device	Average time	Min. time	Max. time	Estimated average time
Devices containing REEs	ABS Block	13.11	2	60	26.40
	Alternator	21.78	5	60	24.40
	Anlasser	25.64	5	95	20.80
	Fensterhebermotor hinten	16.00	5	20	no data
	Fensterhebermotor vorne	17.94	7	31	no data
	Kühlerlüftermotor	16.47	3	35	no data
	Wischermotor hinten	8.75	3	16	no data
	Wischermotor vorne	8.88	3	20	no data
Devices containing PMs	Airbagsteuergerät	14.07	1	35	no data
	Motorsteuergerät	9.84	3	30	14.80
	Multifunktionsanzeige	6.13	2	15	no data
	Navigations System GPS	9.75	7	12	no data
	Radio/CD	9.00	2	21	10.00
	Tachoinstrument	10.68	3	20	10.40
	Total time (min)	188.03			
	Total time (h)	3.13			

REEs: Rare Earth Elements

PMs: Precious Metals

Abbildung 10 zeigt einen Vergleich zwischen den hier berechneten Demontagezeiten und den in Frage 2.4 berechneten Demontagequoten. Es zeigt sich, dass die meisten Geräte mit Elektromotoren (also potenziell mit REE Permanentmagneten) hohe Zerlegeraten und lange Zerlegezeiten aufweisen, während die meisten Geräte mit PWBs niedrige Zerlegeraten bei kurzen Zerlegezeiten aufweisen. In Anbetracht der kurzen Demontagezeit von Geräten, die PWBs enthalten, besteht u.U. eine günstige Möglichkeit, die Demontagequote dieser Art von EE-Geräten zu erhöhen. Durch eine Erhöhung der Demontagequote und eine Folgebehandlung in etablierten EAG-Behandlungsanlagen kann die Rückgewinnung von STMs insbesondere von Edelmetallen aus automobilen PWBs verbessert werden. Die Auswirkungen der Behandlung von solchen PWBs in EAG- Behandlungsanlagen müssen jedoch erst noch analysiert werden.

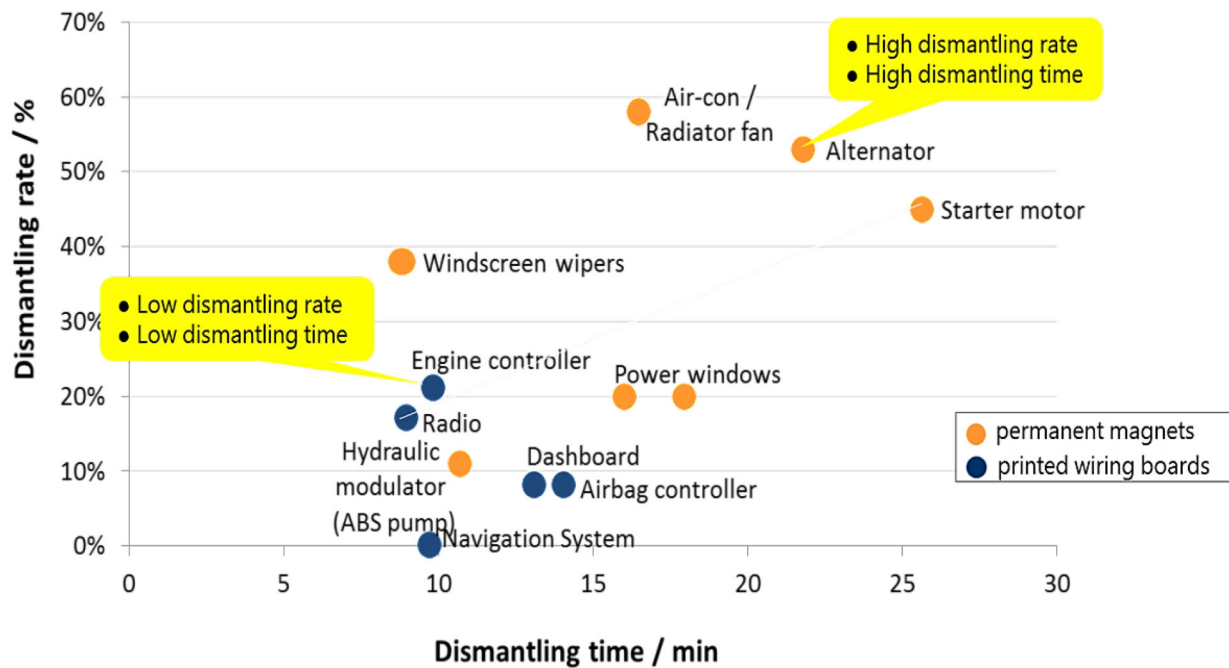


Abbildung 10. Die Zerlegezeit gegenüber der Zerlegerate

Highlights

- EEG die PWBs enthalten haben eine kürzere Demontagezeit als EEG die Permanentmagnete enthalten. Geräte mit PWBs haben jedoch eine geringere Demontagequote. Es besteht also die Möglichkeit, die Demontagequote von Geräten, die PWBs enthalten, zu erhöhen.
- Es dauerte durchschnittlich 3,13 Stunden, um die 12 Fokusgeräte des Experiments zu demontieren. Diese Geräte enthalten etwa 80% der REEs (Dy, La, Nd und Co) und PMs (Ag, Au, Pd und Ru) in einem durchschnittlichen (ca. 18-jährigen) ELV.
- Die Ausbauezeiten und -quoten variieren je nach Demontagebetrieb und Fahrzeug. Um die Robustheit dieser erhobenen Daten zu verbessern, sollten diese Demontageversuche mit größeren Stichproben weitergeführt werden.

2.6 Was sind die Einsparungen an Umweltbelastungen durch die Demontage von STM-reichen Geräten?

Um diese Frage zu beantworten, wurden die Methoden von MFA, LCA und Szenarioanalyse kombiniert. Ein Massenstrommodell wurde erstellt, um die Materialflüsse zwischen verschiedenen Vor- und Endverarbeitungsschritten in verschiedenen STM-Rückgewinnungsszenarien zu simulieren. Für jeden Prozess wurden Life Cycle Impact Assessment (LCIA) Faktoren berechnet, ausgedrückt als Umweltbelastungen (z.B. UBP - Umweltbelastungspunkte⁴, GWP - Global Warming Potential) pro Masseinheit, die in jeden Prozess einfließt oder aus ihm austritt.

⁴ Um einen Vergleich zu haben: Die Umweltbelastung durch das Recycling einer Lichtmaschine (~55000 UBP) ist äquivalent zum Verzicht auf 165 gefahrene Kilometer, oder 55 Liter nicht getrunkenem Bier, oder 660 Gramm nicht gegessenem Rindfleisch etc. (mit der Annahme, dass diese daher nicht produziert werden müssen (Daten von: <https://carbotech.ch/en/projekte/bedeutung-von-100-ubp-umweltbelastungspunkte/>))

Die Systemgrenzen wurden so festgelegt, um das schweizerische ELV-Managementsystem abzudecken, das alle Materialien und Prozesse von der Schadstoffentfrachtung der ELVs (Beseitigung gefährlicher Fraktionen) bis zu dem Punkt umfasst, an dem die aus verschiedenen Vorverarbeitungsschritten (z.B. manuelle Demontage, ELV-Zerkleinerung) resultierenden Fraktionen entweder in Sekundärrohstoffe umgewandelt oder durch Verbrennung und/oder Deponierung beseitigt werden. Die angewandten Systemgrenzen umfassen auch alle notwendigen Transportaktivitäten sowie die vermiedene Produktion von Primärrohstoffen, die 1:1 durch Sekundärrohstoffe aus der Behandlung von Altfahrzeugen ersetzt werden sollen.

Die funktionale Einheit, auf die alle Daten im System normiert sind, wurde definiert als die Behandlung von 11 Fokus-EE-Geräten, die in einem durchschnittlichen Fahrzeug eingebettet sind. Das Spektrum der betrachteten EE-Geräte entspricht der konsolidierten Liste der EE-Geräte, die für Demontageversuche im Rahmen von EVA WP A1-3 ausgewählt wurden (Tabelle 2), wobei die Zusammensetzung auf der Grundlage der Daten von EVA WP A1-3 sowie anderer Quellen (z. B. für den Gehalt an Grundmetallen) definiert wurde. Die Palette der betrachteten STMs entspricht der Auswahl für EVA WP A1-3, d.h. Au, Ag, Pd, Pt, Ru, Dy, La, Nd und Co. Die Daten zur Sachbilanz (LCI) der in die Systemgrenzen einbezogenen Prozesse wurden sowohl aus primären Messungen (z.B. beim ELV-Schredderversuch) als auch aus sekundären Quellen (hauptsächlich aus der ecoinvent 3.4-Datenbank) erhoben.

Die folgenden vier Szenarien wurden berücksichtigt:

- Szenario 0: stellt die aktuelle Situation dar (Basisszenario);
- Szenario 1: Behandlung von SLF in einer fortschrittlichen KVA: identisch mit dem Basisszenario mit der Ausnahme, dass SLF aus der ELV-Zerkleinerung zur Behandlung in eine fortschrittliche KVA (KEZO Hinwil) gegeben wird, die mit Technologien zur Aufbereitung von trockener Rostasche (BA) ausgestattet und somit in der Lage ist, Eisen- und Nichteisenmetalle inklusive STM zurückzugewinnen (was in herkömmlichen-KVA zT kaum möglich war);
- Szenario 2: Demontage von EE-Geräten und mechanische Vorbehandlung: Fokus EE-Geräte werden vor der ELV-Zerkleinerung demontiert und anschließend in einer konventionellen WEEE-Vorverarbeitungsanlage mechanisch behandelt;
- Szenario 3: Demontage von EE-Geräten und manuelle Vorverarbeitung: Fokus-EE-Geräte werden vor der Zerkleinerung von ELVs demontiert und anschließend manuell zerlegt, d.h. ihre Bestandteile wie Leiterplatten und Permanentmagnete werden manuell freigesetzt.

Die mit den vier betrachteten Szenarien verbundenen Umweltauswirkungen (ausgedrückt in UBP) sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Auswirkungen können entweder positiv sein, d.h. Umweltbelastungen darstellen, oder negativ, d.h. Umweltentlastungen. Die Netto-Umweltauswirkungen sind die Differenz zwischen Belastungen und Entlastungen. Belastungen entstehen durch das Recyclingsystem (durch den Material- und Energiebedarf sowie durch Abfälle und Emissionen), während Entlastungen durch die vermiedene Gewinnung und Herstellung von Primärrohstoffen, die durch die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen ersetzt werden können, erreicht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Rückgewinnung von STM aus demontierten EE-Geräten ökologisch besser ist als die Rückgewinnung aus SLF-Verbrennungsrückständen. Die größten Umweltvorteile werden erreicht, wenn demontierte EE-Geräte nach der Demontage manuell vorverarbeitet werden, d.h. ihre Komponenten von Hand demontiert werden. Relativ große Verluste bei der Verarbeitung von SLF-Verbrennungsrückständen verhindern höhere Rückgewinnungsraten von STM und anderen Begleitmetallen wie Kupfer.



Abbildung 11: Umweltauswirkungen der vier Szenarien, in Tausend UBP (Ökopunkte nach der Methode der ökologischen Knappheit 2013 [10]), Beitrag pro Prozess.

Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse für einzelne EE-Geräte in den Szenarien 2 und 3 (d.h. Szenarien, in denen EE-Geräte demontiert werden). Höchste Umwelteinsparungen werden durch die Demontage und das Recycling von relativ schweren Aktuatoren wie Generatoren, Kühlerlüftermotoren und Anlasser ermöglicht. Die Einsparungen durch die Demontage und das Recycling von IKS-Geräten (Informations-Kommunikations- und Steuergeräte) sind geringer als bei Aktuatoren. Dies liegt vor allem an der geringeren Masse der IKS-Geräte - im Durchschnitt 1,2 kg gegenüber 3 kg bei den Antrieben. Bei den Steuergeräten ergeben sich die größten Einsparungen durch die Demontage und das Recycling von relativ schweren Steuerungen wie das Navigationssystem und ICE-/EM Steuerungen. Mit einer zunehmenden Elektrifizierung und Automatisierung der Fahrzeugflotte ist eine Zunahme schwerer Leistungselektronik absehbar und damit u.U. auch der STM-Masse. Interessanterweise sind die Einsparungen bei den Umweltauswirkungen durch STM-Rückgewinnungsmaßnahmen hauptsächlich auf die Rückgewinnung von IBM, v.a. Kupfer, Eisen (in Form von Stahl) und Aluminium, zurückzuführen. Die Rückgewinnung von Edelmetallen, insbesondere von Au, trägt wesentlich zur Umweltentlastung der IKS-Geräte bei. Beispielsweise enthält ein Navigationssystem etwa 800-mal mehr Kupfer als Gold, jedoch sind die Umweltbelastungen (UBP) durch die Primärproduktion von 1 kg Gold 1000-mal höher als durch die Primärproduktion von 1 kg Kupfer. Dies erklärt, warum Gold einen wichtigen Beitrag zur Gesamteinsparung durch das Recycling von Navigationssystemen in Szenario 3 leistet. Das Recycling von REE in EE-Geräten trägt nur zu geringen Entlastungen bei, da die Belastungen bei der Primärproduktion im Vergleich zu Edelmetallen gering sind. Beispielsweise enthält ein Alternator etwa 900-mal mehr Kupfer als Neodym, aber beide Metalle verursachen in ihrer Primärproduktion vergleichbare Umweltbelastungen. Aus diesem Grund sind die Umwelteinsparungen durch die Rückgewinnung von Neodym im Vergleich zur Rückgewinnung von Kupfer (und anderen Basismetallen) sehr gering.

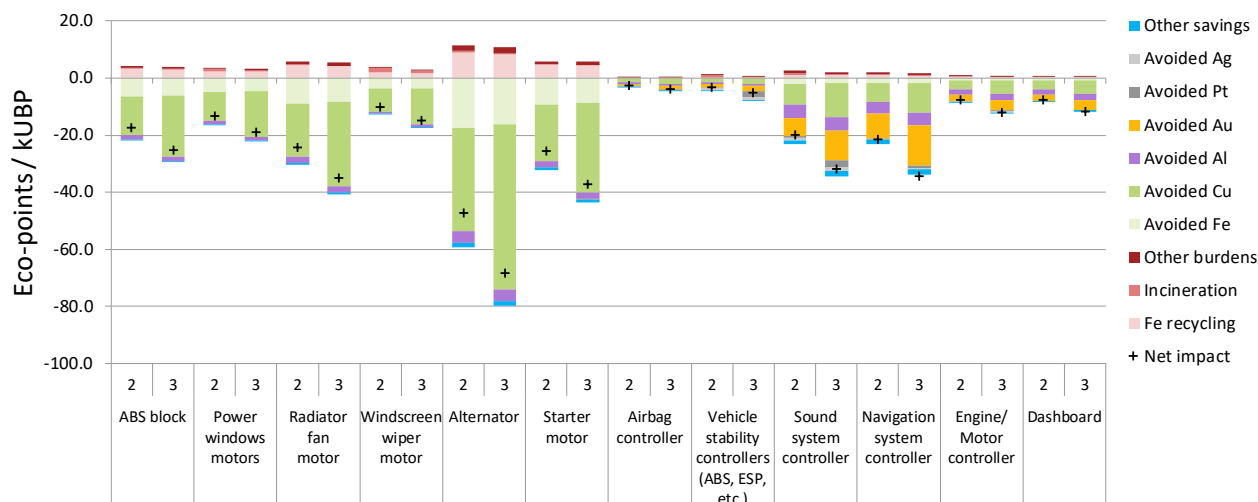


Abbildung 12: Umweltwirkungen pro EE-Gerät in Szenario 2 und 3, ausgedrückt in Tausend UBP (Öko-punkte nach der Methode Ecological Scarcity 2013 [10]), Beitrag pro Prozess.

Aus diesen Ergebnissen könnte man schließen, dass vor dem Schreddern nur Aktoren demontiert werden sollten. Dies würde jedoch zu hohen Verlusten von STMs aus IKS-Geräten führen, die meist bei der Schreddern von ELVs in Fraktionen gelangen, aus denen sie nicht zurückgewonnen werden (können). Daher führt die Priorisierung von EE-Geräten nach dem gesamten Umweltnutzen, der durch ihr Recycling ermöglicht wird, nicht immer zu höchsten STM-Rückgewinnungsraten. Wenn das Ziel darin besteht, die Rückgewinnung von STMs zu maximieren (und nicht den gesamten Umweltnutzen), dann sollten auch die tatsächlichen Mengen an STMs, die pro Gerät zurückgewonnen werden, bei der Priorisierung berücksichtigt werden.

Daten, die zur Modellierung von Massenströmen und Lebenszyklusausswirkungen verwendet wurden, haben je nach Herkunft unterschiedliche Qualitäten. Die Ergebnisse sind daher z.T. ungewiss und sollten mit Vorsicht betrachtet werden. Künftig wären weitere Anstrengungen für neue und zuverlässigere Daten, insbesondere zum STM-Gehalt von ELVs, zum STM-Verbleib in der ELV/WEEE-Behandlungsketten und zu LCA-Daten sowohl der primären als auch der sekundären STM-Produktion von Nutzen.

Eine wichtige Einschränkung der Ergebnisse dieser LCA Studie ist, dass lediglich eine Auswahl an automobilen EE-Geräte und STMs in die LCA-Studie einbezogen wurden. Diese entspricht der angenommenen ELV-Zusammensetzung eines durchschnittlichen Fahrzeugs das repräsentativ für die in den nächsten 5 bis 10 Jahren anfallenden ELVs ist. STM-reiche EE-Geräte in Elektro-/Hybridfahrzeugen wurden nicht berücksichtigt, da sie im aktuellen Bestand sehr selten sind. Zukünftige Forschung sollte den Umfang nachfolgender LCA-Studien um zusätzliche STMs und EE-Geräte in Richtung einer zunehmend "elektrifizierten" Fhz-Flotte erweitern.

Highlights	<ul style="list-style-type: none">• Alle betrachteten STM-Rückgewinnungsmaßnahmen führen zu Umwelteinsparungen, wobei die größten Einsparungen erzielt werden, wenn STM-reiche EE-Geräte vor dem ELV-Schredder demontiert und manuell in verschiedene STM-reiche Komponenten (z.B. Leiterplatten, Permanentmagnete) zerlegt werden. Verluste bei der ELV-Zerkleinerung und Verarbeitung von Schlacke aus der SLF-Verbrennung führen zu vergleichsweise geringeren Umwelteinsparungen.• Höchste Umwelteinsparungen werden durch die Demontage und das Recycling von relativ schweren Aktuatoren wie Generatoren, Kühlerlüftermotoren und Anlasser erreicht. Die Einsparungen, die durch die Demontage und das Recycling von IKS-Geräten möglich werden, sind geringer als die von Aktuatoren, was hauptsächlich auf die geringere Masse der IKS-Geräte zurückzuführen ist.• Aufgrund der relativen Massen, die durch die STM-Rückgewinnungsmaßnahmen ermöglichten Umweltentlastungen sind hauptsächlich auf die gemeinsame Rückgewinnung von gleichzeitig vorkommenden Basismetallen, hauptsächlich Kupfer, Stahl und Aluminium, zurückzuführen. Dies gilt insbesondere für Aktoren, während bei IKS-Geräte STMs, insbesondere Gold, wesentlich zur Umwelteinsparung beitragen.• Die Art und Zusammensetzung der betrachteten EE-Geräte entsprechen einem durchschnittlichen Fahrzeugbestand (Kohorte 2007). In zukünftiger Forschung wäre es interessant, EE-Geräte zu berücksichtigen, die in neueren Fahrzeugen vorkommen, insbesondere STM-reiche EE-Geräte in Elektro-/Hybridfahrzeugen.
------------	---

2.7 Welche EE-Geräte sollten demontiert werden, um den Umweltnutzen zu maximieren und den Demontageaufwand zu minimieren

Um eine einfache Visualisierung der Lösung der anstehenden Optimierungsaufgabe zu ermöglichen, schlagen wir ein 3d-Diagramm mit den drei Koordinatenachsen "Demontageaufwand", "Ausbauhäufigkeit" und "UBP-Einsparungen" vor. Also eine Grafik die derjenigen in Abbildung 10 die Umweltentlastung als z-Achse hinzufügt. Die Skalen der Achsen werden so gewählt, dass Geräte in dieser Ansicht die "besten" EE-Geräte in der 'hinteren, oberen' Ecke gezeigt werden, wodurch sie gut sichtbar sind.

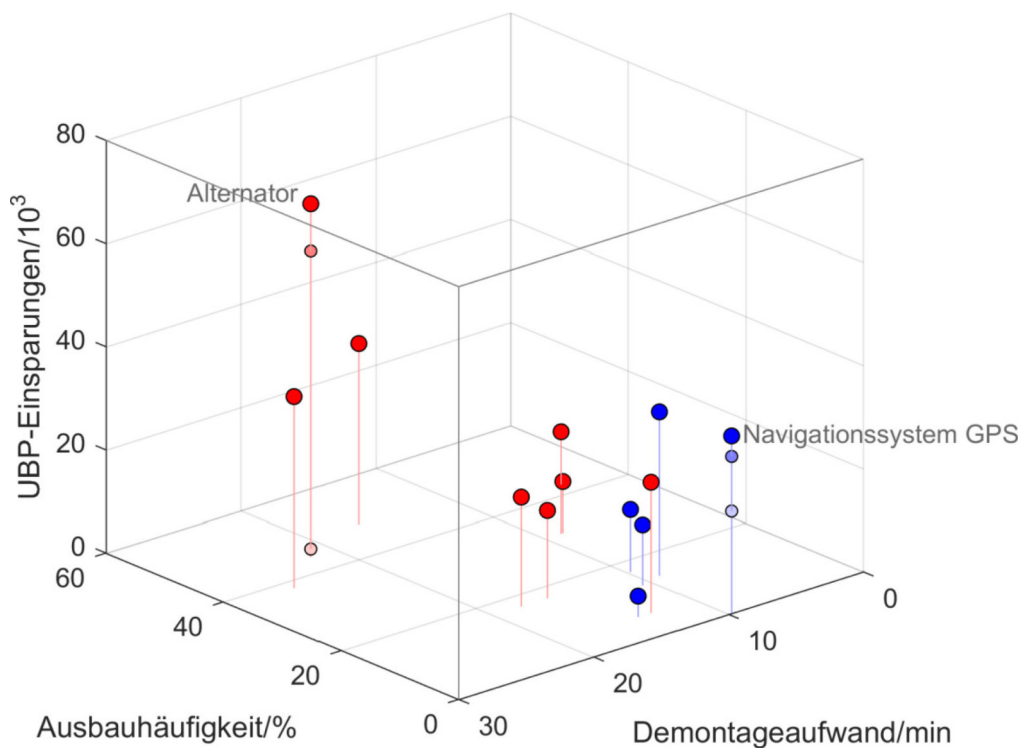
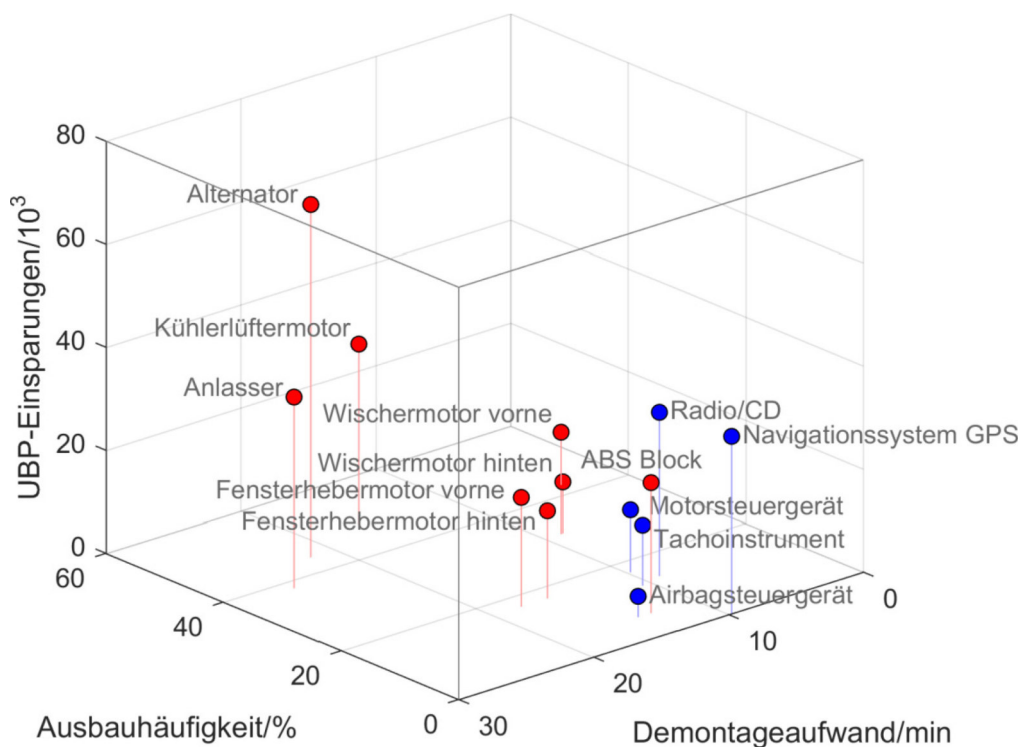


Abbildung 13. Im oberen Plot sind PM-reiche IKS-Geräte (blau) und REE-reiche Aktuatoren⁵ (rot) eingetragen. Es wird deutlich, dass "rote" EEG häufiger ausgebaut werden als "blaue" und dass alle, "rote" wie "blaue", EEG beträchtliche Umweltentlastungen ergäben, wenn sie nach Szenario 3 behandelt würden. Im unteren Plot werden zusätzlich zwei blässere Punkte eingetragen: der obere blässere Punkt zeigt die Umweltentlastungen ohne Fe und Al, und der untere blässere Punkt ohne Fe, Al und Cu einzubeziehen.

⁵ Ein Aktuator ist eine Komponente einer Maschine, die für das Bewegen eines Mechanismus verantwortlich ist. Aktuatoren sind in diesem Zusammenhang gleichbedeutend mit Elektromotoren.

Es wird am Beispiel "Alternator" deutlich, weshalb für "rote" EEG bereits ein gutes Recyclingpotenzial zusätzlich zur Ersatzteilgewinnung besteht. Die Alternatoren die nicht ausgebaut werden und deren Bestandteile nach dem Schreddern aussortiert werden können, ergeben in etwa dieselben Umweltentlastungen wie in Szenario 3. Dies gilt in diesem Fall für Fe und Al, aber nur bedingt für Cu, weil es in Form von Wicklungen im Eisen eingebettet vorkommt (sog. Anker) und in dieser Behandlung nicht freigesetzt wird sondern nach dem Schredder als sog. "meat balls" vorliegen. Der untere blässere Punkt zeigt deutlich, dass die Umweltentlastung wesentlich von der Rückgewinnung von möglichst allem Cu abhängt. Das Rezept lautet hier demnach: 1) falls "meat balls" nicht aufgetrennt werden können, sollten alle Alternatoren ausgebaut und 2) diejenigen, die nicht in den Ersatzteilhandel gehen, weiter zerlegt werden, bis die Cu-Wickel freigesetzt sind und 3) der defekte Alternator, der durch das Ersatzteil ersetzt wird, sollte die gleiche Behandlung wie die Nicht-Ersatzteil-Alternatoren erfahren.

Am Beispiel "Navigationssystem GPS" zeigt sich ein etwas anderes Bild: diese EEG werden kaum als Ersatzteile ausgebaut, d.h. alle werden geschreddert, wodurch die mögliche Umweltentlastung gering ist (der erste blasse Punkt für den Fe und Al Anteil). Erst wenn Cu und der Rest (meist PM) ebenfalls zurückgewonnen wird, ergibt sich eine namhafte Umweltentlastung. Das Rezept lautet hier demnach: 1) alle Navis sollten ausgebaut werden und 2) daraus sind Kabel, Stecker und Leiterplatten zu entnehmen und 3) diese sind einer Cu + PM Behandlungsanlage zuzuführen.

Highlights Mit einer grafischen 3d-Darstellung mit einem Koordinatensystem das ein Dreibein von Ausbaur Aufwand, gegenwärtige Ausbaurhäufigkeit und Umweltentlastung aufspannt, lässt sich in einer grossen Schar von Kandidaten-EAG eine räumlich unterscheidbare Gruppe identifizieren die entnommen werden sollte.
--

2.8 Was ist das zukünftige Potenzial für das automobiler EEG Recycling?

Angesichts der Tatsache, dass sich die Masse und Verteilung von STMs in EEG mit der Zeit ändert, erfordert die Umsetzung der revidierten Verordnung über das Recycling von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (VREG) die Analyse langfristiger Strategien zum Recycling von eingebetteter Automobilelektronik.

Wesentliche Änderungen in der Zusammensetzung des Fuhrparks werden vor allem erwartet durch: i) höhere Anzahl von Plug-in-Hybrid- und Elektrofahrzeugen, ii) höhere Anzahl von eingebetteten elektronischen Steuerungssystemen in allen Fahrzeugtypen, iii) Änderungen in Art und Anzahl der EE-Geräte und iv) Änderungen im Nutzerverhalten. Wir betrachten diese großen Veränderungen, um die Frage nach dem zukünftigen Potenzial für das Recycling von Automobilelektronik zu beantworten. Konkret führen wir eine dynamische Materialflussanalyse (dMFA) in Kombination mit einer Szenarioanalyse durch, um die zukünftige Anzahl und Art der in die Fhz-Flotte eintretenden und der das Ende der Lebensdauer erreichenden PKWs abzuschätzen. Die für die Analyse betrachtete Zeitspanne beträgt 1950 bis 2050. Im Folgenden stellen wir die vorläufigen Ergebnisse dieser laufenden Arbeiten vor.

Wir haben insgesamt vier Szenarien definiert; zwei spiegeln mögliche technologische Entwicklungen im Automobil wider, die ändern beiden spiegeln mögliche Verhaltensänderungen von Automobilnutzern wider. Tabelle 3 fasst die Szenarien zusammen. Szenario 1 ist das Referenzszenario (REF); Dabei werden die vergangenen Trends in die Zukunft projiziert. Szenario 2 oder NEP untersucht eine starke Anpassung der vom Bundesamt für Energie (BFE) definierten "Neuen Energiepolitik" (NEP); In diesem Szenario leisten Autos einen größeren Beitrag zur Energieeinsparung und Reduzierung der CO₂-Emissionen, vor allem durch effizientere Verbrennungsmotoren (ICEs) sowie mehr Elektro- und Hybridfahrzeuge in der

Flotte. Dieses Szenario basiert auf dem "efficiency" -Szenario von de Haan et al., 2013 [11], mit dem Unterschied, dass wir die Effizienz der konventionellen Autos auf die Größe des Motors und nicht auf die Größe des gesamten Autos beziehen. Dies soll die Trends bei der Fahrzeuggröße und der Motorgröße genauer widerspiegeln: Die Durchschnittsgröße der Fahrzeuge hat weiter zugenommen, obwohl ICEs im Durchschnitt kleiner geworden sind (d. H. Effizienter). Szenario 3 oder Integrierte Mobilität (IMO) untersucht die Integration von Privatfahrzeugen mit öffentlichen Verkehrsmitteln; Insbesondere wird davon ausgegangen, dass öffentliche Verkehrsmittel für längere Fahrten bevorzugt werden, während Privatfahrzeuge für kürzere Fahrten und zum Erreichen des öffentlichen Verkehrs genutzt werden. Unter diesen Annahmen werden kleinere (vor allem elektrische) Autos in größerem Umfang akzeptiert, da das Größe/Reichweite-Dilemma durch die Integration mit dem öffentlichen Verkehr gelöst wird. Dieses Szenario basiert auf dem "Connected Mobility" -Szenario von de Haan et al., 2013[11]. Szenario 4 oder Shared Mobility (SMO) untersucht eine moderate Verlagerung von Privatautos durch (vor allem elektrische) Shared Cars, die von einer höheren Wertschätzung für Con getrieben wird -Verdienlichkeit, Unmittelbarkeit und verbundene Technologie über das Gefühl des Status erworben von einem Auto besitzen. In diesem Szenario nimmt die Fahrzeugflotte aufgrund des verringerten Fahrzeugbesitzes leicht ab.

Eine Zusammenfassung der betrachteten Szenarien für die zukünftige Anzahl und Art der PKW im Bestand ist in Tabelle 3 dargestellt. Die zukünftige Aufteilung von PKW-Antriebsarten und PKW-Massenklassen unter den verschiedenen Szenarien wird in Abbildung 14 bzw. Abbildung 15 dargestellt. In allen angewendeten Szenarien übersteigt die Anzahl der Neufahrzeuge mit Elektro- und Hybridantrieb die Anzahl der Neufahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICE) in 20 Jahren. Was die Masse der Neuwagen anbelangt, so berücksichtigt nur das Szenario der Integrierten Mobilität (IMO) eine starke Verringerung der Fahrzeugmasse, die durch ein verändertes Nutzerverhalten und die verstärkte Integration verschiedener Verkehrsmittel ermöglicht wird.

Der Gesamtbestand an Fahrzeugen unter den verschiedenen Szenarien ist in Abbildung 16 dargestellt. Der Bestand an PKW entwickelt sich für alle Szenarien ähnlich, mit Ausnahme des gemeinsamen Mobilitätsszenarios, bei dem der Bestand an Personenkraftwagen aufgrund eines Anstiegs der Zahl der Fahrzeuge in gemeinsamen Mobilitätssystemen leicht abnimmt.

Tabelle 3. Szenarien für die zukünftige Typenaufteilung und Anzahl der in der Schweiz zugelassenen Neufahrzeuge

Szenarien für Typenaufteilung und Anzahl der Fahrzeuge		Annahmen bis 2050 (Quellen: [11]–[14])	
1	Referenz (REF) Historischer Autotyp-Split in die Zukunft projiziert.	Die Aufteilung der Fahrzeugtypen folgt den Trends der Vergangenheit.	Technologisch vor allem durch Regulierung getriebene Entwicklungen
2	Neue Energiepolitik (NEP) Autos leisten einen größeren Beitrag zur Energieeinsparung und CO ₂ -Reduzierung. Es gibt einen erhöhten Anteil an konventionellen Fahrzeugen mit effizienteren (d.h. kleineren) Verbrennungsmotoren sowie Hybrid- und Elektroautos.	30% der Neuwagen sind rein elektrisch 40% der Neuwagen sind Hybridfahrzeuge 64% der Fahrzeuge mit ICEs haben Motoren der Größen <1399 cm ³ - 1999 cm ³ .	
3	Integrierte Mobilität (IMO)	49% der Neufahrzeuge haben eine	

<p>Längere Fahrten werden in der Regel mit öffentlichen Verkehrsmitteln kombiniert. Kleinere Autos, vor allem vom elektrischen Typ, werden aufgrund eines aufgelösten Größe / Reichweite - Dilemmas häufiger akzeptiert.</p>	<p>Masse von <999 - 1499 kg (gegenüber nur 4% im REF-Szenario, wo 96% der Fahrzeuge bis 2050 auf >1500 kg geschätzt werden). 55% der neuen Elektroautos sind 1000 kg - 1499 kg 2% der Hybridfahrzeuge sind <999 kg - 1499 kg 10% der Benzinfahrzeuge sind 1000 kg -1499 kg 1% der Diesel-Pkw sind 1250 kg - 1499 kg</p>	<p>Verhaltensänderungen finden statt</p>
<p>4 Gemeinschaftliche Mobilität (SMO) Komfort, Unmittelbarkeit und angeschlossene Technik werden mehr geschätzt als der Besitz eines Autos; dies führt zu einem Rückgang des Fahrzeugbesitzes.</p>	<p>Bis 2050 sind 50 000 Fahrzeuge auf Lager. Ein gemeinsames Auto ersetzt 10 Privatwagen.[13] 40% der Neuwagen sind rein elektrisch.</p>	

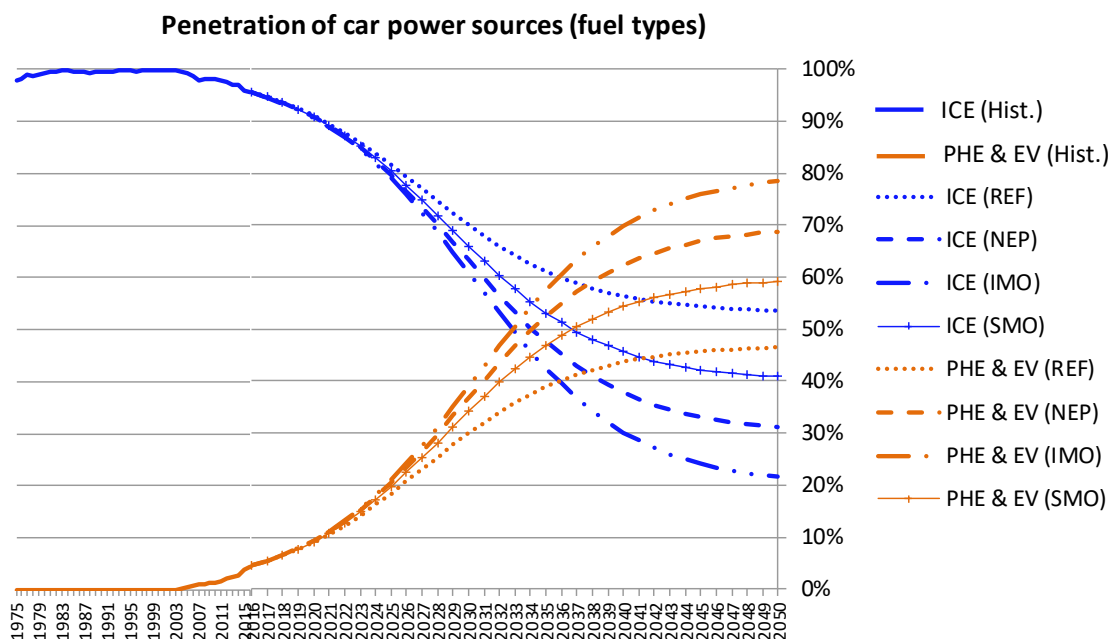


Abbildung 14. Entwicklung des Flottenmix nach Antriebsenergie 1975-2050.

- ICE : Internal Combustion Engine (Verbrennungsmotor)
- PHE: Plug-in Hybrid Electric
- EV: Electric Vehicle
- Hist : Historical Development (historische Entwicklung)
- REF : Reference Scenario
- IMO: Integrated Mobility Scenario
- SMO: Shared Mobility Szenario

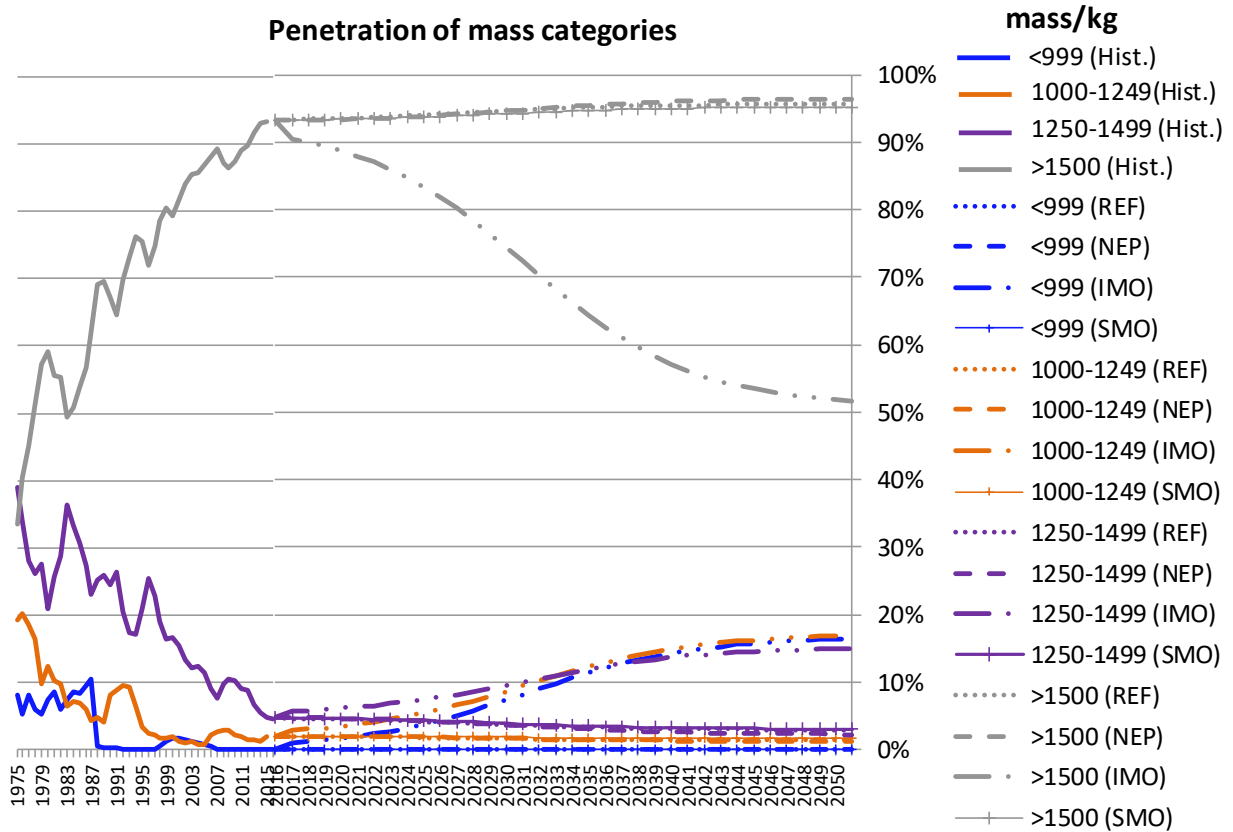


Abbildung 15. Entwicklung des Flottenmix nach Fahrzeug Leermassen 1975-2050.

Hist : Historical Development (historische Entwicklung)
 REF : Reference Scenario
 IMO: Integrated Mobility Scenario
 SMO: Shared Mobility Scenario

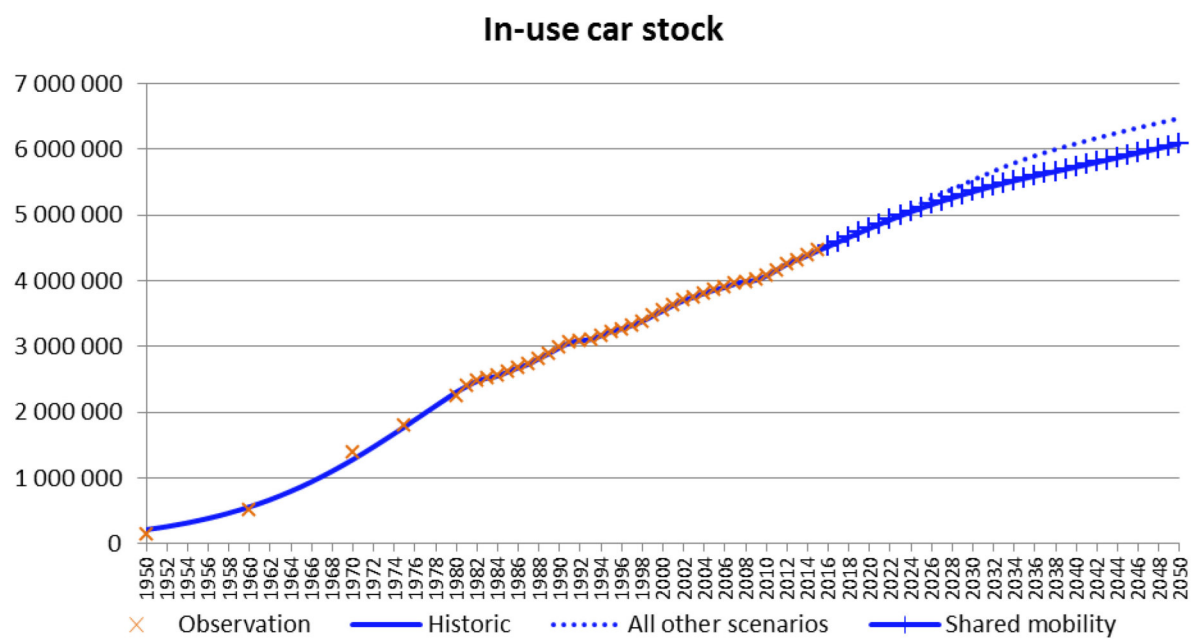


Abbildung 16. Entwicklung der Fahrzeugflotte für den Zeitraum 1950-2050.
 „Observation“ (Beobachtung) bedeutet reale historische Werte.

Die vorläufigen Ergebnisse der dMFA für das REF-Szenario sind in der Abbildung 17 und Abbildung 18 dargestellt. Die Farben stellen den Anteil der verschiedenen Kohorten am Gesamtbestand bzw. den Abfluss von ELVs dar. Gegenüber 2015 steigt der Pkw-Bestand um 45%, der Abfluss von Pkw und die entsprechende Anzahl der in der Schweiz behandelten Altfahrzeuge um 58%. Gemäss diesen Ergebnissen müssen die verschiedenen Akteure und Prozesse des Altfahrzeugrecyclings im Rahmen einer möglichen historischen Entwicklung des Automobilssektors in der Schweiz darauf vorbereitet sein, rund 57 000 Altfahrzeuge mehr zu behandeln als im Jahr 2015.

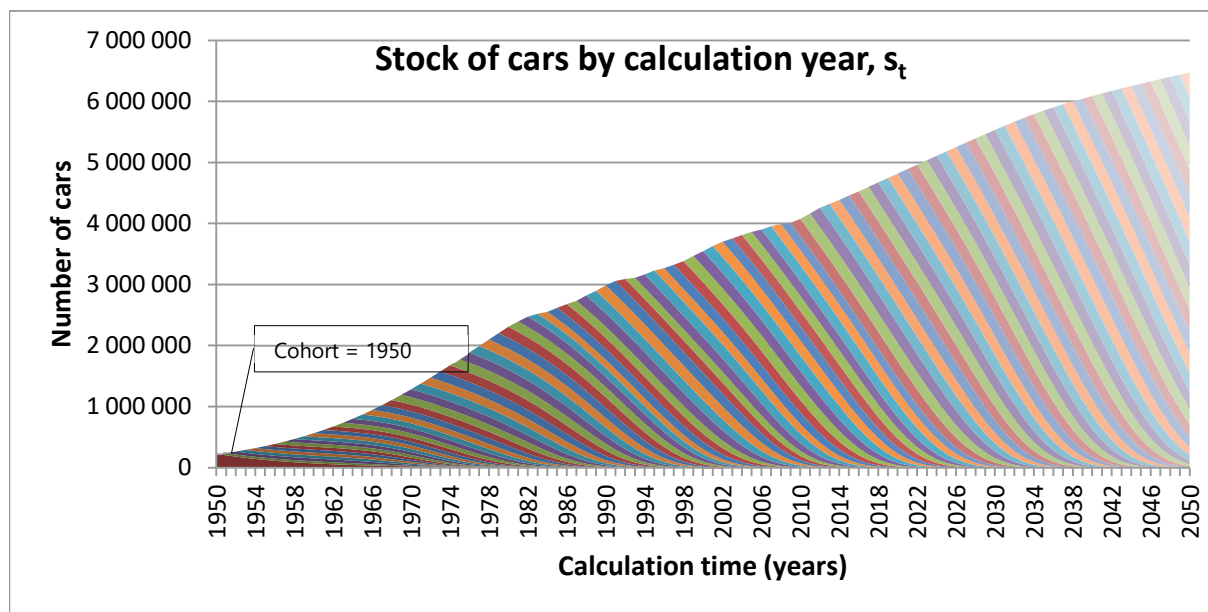


Abbildung 17. Entwicklung der Fahrzeugflotte mit den Jahrgängen 1950-2050 (REF scenario).

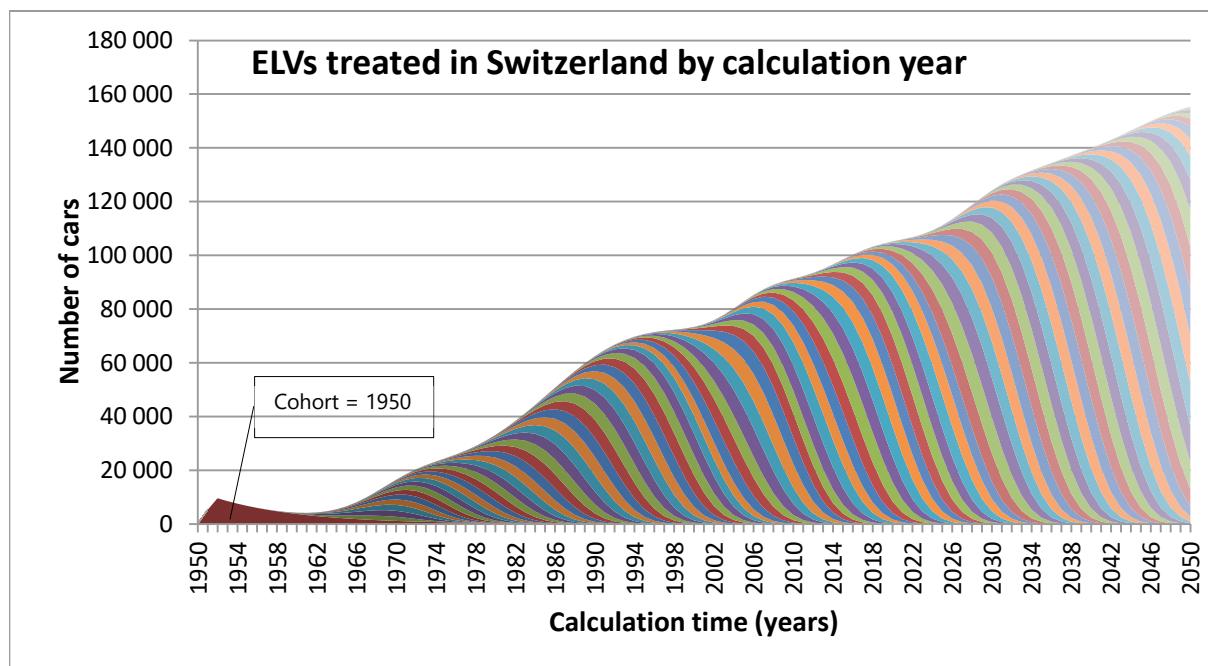


Abbildung 18. Entwicklung der ELV-Ströme mit den Jahrgängen 1950-2050 (REF scenario). Ein vertikaler Schnitt durch den Stapel zeigt die Jahrgangszusammensetzung des entsprechenden Jahres.

Highlights Bei einem Referenzszenario, das eine historische Entwicklung des Fuhrparks berücksichtigt, ist mit einem Anstieg der Zahl der Altfahrzeuge in der Schweiz um 58% zu rechnen. Das sind 57 000 ELVs mehr als im Jahr 2015.

3 Ergebnisse und Ausblick

Was haben wir aus EVA 1 gelernt?

- Die STM Gehalte von EEE ändern stark und die vorhandenen Daten sind bereits älter und lückenhaft; trotzdem konnten "Fokusgeräte" bestimmt werden:
 - 80% der PM und REE Masse in EEE aus PWs finden sich in den ausgewählten Fokusgeräten (6 ICT Geräte und 6 Aktuatoren) für ELV der Jahrgänge 2000
 - Die zugänglichen Daten der ursprünglichen EEE Bestückung und Entnahme, erlauben die Berechnung eines Erwartungswertes der STM Gehalte in der SLF
 - Die erhobenen Daten zu Ausbauhäufigkeit und -aufwand lassen sich nun auf jedes Fokusgerät in einem durchschnittlichen PW angeben
- Die Messung der STM Gehalte einer grösseren Menge SLF von bekannten ELV ist sehr herausfordernd, lieferte aber folgende Einsichten:
 - Höhere STM Gehalte in SLF von neueren PWs
 - STM sind konzentrierter im Feinanteil der SLF (aber die Frachten sind höher im Grobanteil)
 - Einige Metalle, z.B. Au, sind als Nuggets verteilt
 - Systematische Fehler bei der Probenaufbereitung werden vermutet, welche obige Aussagen jedoch nicht ändern
- Der vermiedene Umweltschaden durch STM Rückgewinnung konnte berechnet werden
 - das MFA-Modells zeigen, dass die STM-Rückgewinnung aus EE-Geräten derzeit niedrig ist (< 40% bei PM, 0% bei REE).
 - STM Rückgewinnung aus demontierten EE-Geräten ist umweltfreundlicher als aus SLF-Verbrennungsrückständen.
 - Fokusgeräte mit den höchsten UBP Einsparungen sind schwere Aktuatoren wie Lichtmaschinen, Kühlerlüftermotoren und Startermotoren jedoch v.a. wegen der Rückgewinnung von Fe, Cu und Al!. Die Einsparungen bei IT-Produkten sind oft höher als bei Aktuatoren, wenn nur STM berücksichtigt werden.
- Als geeignete Indikatoren werden die gegenwärtige Ausbauhäufigkeit, der heutige Ausbauaufwand und der erzielbare Umweltentlastung vorgeschlagen.
 - Die entsprechenden Werte der Fokusgeräte werden in einem "Dreibein" aus Ausbauaufwand, Ausbauhäufigkeit und Umweltnutzen eingetragen und können so grafisch untereinander verglichen werden.

Was sollten wir zusätzlich wissen? (Basis für EVA 2)

- Technologie Ausblick:
 - Was sind relevante EEG Bauteile in zukünftigen Fahrzeugen?
 - Was sind STM-Gehalte in neuartigen automobilen EE-Geräten?
 - Wie entwickeln sich ELV und EEG Behandlungs- und STM-Rückgewinnungstechnologien weiter?
- Wirtschaftliche Machbarkeit:
 - Kosten für die Demontage von EE-Geräten & STM-Recycling?

- Gibt es einen Markt für relevante STMs?
- Wie verhindert man einen Zusammenbruch der Ersatzteil-Marktpreise wenn zu viele / alle EEG ausgebaut würden?
- Was wären geeignete Finanzierungsmodelle für die Demontage von Teilen, die in die VREG aufgenommen werden sollen?
- Weiterentwicklung / Vervollständigung und Aufrechterhaltung der Kenntnisse des schweizerischen ELV-Managementsystems:
 - Repräsentative Umfrage bei CH Garagisten etc. zum Austausch und zur Entsorgung von defekten EE-Geräten
 - STM Analyse von ausgewählten Komponenten (v.a. Magnete und PWB) insbesondere aus zukünftigen Fahrzeugtypen.
 - Festlegen von repräsentativen und aktuellen Indikatoren und regelmässiger Erhebung der dafür notwendigen Daten (z.B: nebst Schadstoff- und IBM- auch die STM Gehalte in SLF messen)
 - Harmonisierung des Datamanagement, Zugang für Datamining öffnen

4 Bibliographie

- [1] PwC, "Spotlight on Automotive PwC Semiconductor Report," 2013.
- [2] R. Widmer, X. Du, O. Haag, E. Restrepo, and P. Wäger, "Scarce Metals in Conventional Passenger Vehicles and End-of-Life Vehicle Shredder Output," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 7, pp. 4591–4599, 2015.
- [3] Swiss Federal Office for the Environment (FOEN), "Revision der Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG, SR 814.620)." FOEN, 2013.
- [4] 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," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51, no. 3, pp. 1129–1139, Feb. 2017.
- [5] P. H. Brunner and H. Rechberger, *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. USA: CRC Press, 2004.
- [6] A. N. Løvik, R. Modaresi, and D. B. Müller, "Long-term strategies for increased recycling of automotive aluminum and its alloying elements," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, no. 8, pp. 4257–4265, 2014.
- [7] Swico, "Technical Report Swico/SENS/SLRS 2015," 2015. [Online]. Available: <http://www.swicorecycling.ch/en/news-media/publications>. [Accessed: 09-Nov-2016].
- [8] H. Böni *et al.*, "Rückgewinnung von kritische Metallen aus Elektronikschrot am Beispiel von Indium un Neodym," FOEN, Switzerland, 2015.
- [9] E. Thiébaud, "Personal interview about critical metals in Swiss household electronics," 11-Sep-2016.
- [10] R. Frischknecht and B. K. Sybille, "Swiss Eco-Factors 2013 according to the Ecological Scarcity Method," p. 256, 2013.
- [11] P. de Haan *et al.*, *Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz/ Peter de Haan; Rainer Zah. Mit Beitr. von Hans-Jörg Althaus*. Zürich: vdf, 2013.
- [12] BFE, "Energieperspektiven 2050." Bundesamt für Energie, 2013.
- [13] PwC, "Re-inventing the wheel: Scenarios for the transformation of the automotive industry." PwC, 2015.
- [14] S. Le Vine, A. Zolfaghari, and J. Polak, "Carsharing: Evolution, Challenges and Opportunities," ACEA, 22.