

# Elektrofahrzeugrecycling 2020 – Schlüsselkomponente Leistungselektronik ElmoReL 2020

Förderkennzeichen 16EM2032-1

Laufzeit des Vorhabens 01.12.2013 – 30.11.2016



Darmstadt, 20.4.2017

## Endbericht

Gefördert durch das:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit

## Autorinnen und Autoren

Dr. Doris Schüler, Öko-Institut e.V.  
Dr. Winfried Bulach, Öko-Institut e.V.  
Stefanie Degreif, Öko-Institut e.V.  
Dr. Matthias Buchert, Öko-Institut e. V.

Guido Sellin, Electrocycling GmbH

Prof. Dr.-Ing. Tobias Elwert; TU Clausthal  
Prof. Dr.-Ing. Goldmann, TU Clausthal

Dr. Dieter Schmid, Volkswagen AG

Dr. Ulrich Kammer, PPM Pure Metals GmbH

**Öko-Institut**

**Büro Darmstadt**

Rheinstraße 95  
64295 Darmstadt  
Telefon +49 6151 8191-0

**TU Clausthal**

Walther-Nernst-Str. 9  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
Telefon +49 53 23 72-0

**Volkswagen AG**

Berliner Ring 2  
38440 Wolfsburg  
Telefon +49 5361-9- 0

**PPM Pure Metals GmbH**

Am Bahnhof 1  
38685 Langelsheim  
Telefon +49 5326 507-0

**Electrocycling GmbH**

Landstraße 91  
38644 Goslar  
+49(0)5321/3367-0

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>1. Zusammenfassung</b>	<b>9</b>
<b>2. Zielstellung und Beschreibung des Vorhabens</b>	<b>10</b>
<b>3. Struktur des Projekts und Zusammenarbeit der Partner</b>	<b>11</b>
<b>4. Ausgangssituation und Entwicklungsbedarf</b>	<b>13</b>
<b>4.1. Stand der Technik und Trends in der LE</b>	<b>13</b>
4.1.1. Silizium-Carbid und Gallium-Nitrid als neue Leistungshalbleiter	13
4.1.2. Weitere Bauelemente	14
4.1.3. Ansätze zur Dezentralisierung der Leistungselektronik	14
4.1.4. Fazit	15
<b>4.2. Stand der Technik beim Recycling von LE</b>	<b>15</b>
4.2.1. Altfahrzeugrecycling	15
4.2.2. Elektronikrecycling	16
<b>5. Wissenschaftliche und technische Arbeitsergebnisse des Vorhabens</b>	<b>17</b>
<b>5.1. Analytik der Leistungselektronik</b>	<b>17</b>
<b>5.2. Entwicklung einer Recyclingroute für die Leistungselektronik mit optimierter mechanischer Aufbereitungstechnik</b>	<b>19</b>
5.2.1. Demontage	19
5.2.2. Zerlegung und mechanische Aufbereitung (ECG)	21
5.2.3. Aufkonzentration von Gallium aus den Leistungschips	26
5.2.4. Weitere Verwertung der erzeugten Wertstofffraktionen	32
<b>5.3. Entwicklung einer zusätzlichen Aufbereitungsstufe mittels chemischer Platinentstückung</b>	<b>32</b>
5.3.1. Chemische Platinentstückung im Säurebad (IFAD)	32
<b>5.4. Ökobilanzielle Betrachtung</b>	<b>33</b>
5.4.1. Methodik und Systemgrenzen	33
5.4.2. Rückgewinnungsquoten	35
5.4.3. Ergebnisse	35
<b>5.5. Ressourceneinsparungspotentiale</b>	<b>36</b>
<b>5.6. Ökonomische Betrachtung (Öko-Institut und Partner)</b>	<b>37</b>
<b>6. Darstellung wesentlicher Abweichungen zum Arbeitsplan</b>	<b>39</b>

<b>7.</b>	<b>Zusammenarbeit mit anderen Stellen und Fortschritte von anderen Seiten</b>	<b>40</b>
<b>8.</b>	<b>Wissenschaftlicher Nutzen, Verwertung und Veröffentlichungen</b>	<b>40</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>42</b>
	<b>Anhang: Ökobilanzbericht</b>	<b>44</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Arbeitspakete und Zeitplan	11
Abbildung 2	Übliche Recyclingroute für Altfahrzeuge	15
Abbildung 3	Gutes Bildmaterial aus Reparaturleitfaden	19
Abbildung 4	Bildmaterial, das die Einbaulage der Leistungselektronik gut beschreibt	20
Abbildung 5	Bildmaterial, das nur grobe Schätzungen der Ausbauezeiten zulässt	20
Abbildung 6	Aussagekraft der ermittelten Ausbauezeiten	20
Abbildung 7	Zusammensetzung von Leistungselektronik nach manueller Zerlegung (Quelle ECG)	21
Abbildung 8	Aufbau und Wirkweise einer Prallmühle (Quelle ECG)	22
Abbildung 9	Mitarbeiter am Sortierband nach der Prallmühlenbeanspruchung (Quelle ECG)	23
Abbildung 10	Material auf Sortierband (Quelle ECG)	23
Abbildung 11	Fraktion Aluminium mit Anhaftungen (Quelle ECG)	24
Abbildung 12	Fraktion Leiterplatten (Quelle ECG)	24
Abbildung 13	Fraktion Zielplatine (Quelle ECG)	24
Abbildung 14	Fraktion Prozessoren (Quelle ECG)	25
Abbildung 15	Restfraktion zur weiteren Mechanischen Aufbereitung (Quelle ECG)	25
Abbildung 16	Gehäusebestandteile ohne vollständigen Aufschluss – Wiederaufgabe (Quelle ECG)	25
Abbildung 17	Massenverteilung der Fraktionen nach maschineller Zerlegung in der Prallmühle (Quelle ECG)	26
Abbildung 18	Hochleistungsplatine mit Chips-Struktur (Quelle ECG)	27
Abbildung 19	Arbeitsweise der Kugelmühle –Kataraktbewegung (Quelle ECG)	27
Abbildung 20	eingesetzte Mahlkörper – Kugeln verschiedener Durchmesser (Quelle ECG)	28
Abbildung 21	eingesetzte Kugelmühle während des Versuches (Quelle ECG)	28
Abbildung 22	Hochleistungsplatinen in der Kugelmühle nach $t_3$ (Quelle ECG)	29
Abbildung 23	genutzte Planetenkugelmühle am IFAD (Quelle ECG)	30
Abbildung 24	„Planet“ – Mahlraum mit Mahlkörperfüllung (Quelle ECG)	30
Abbildung 25	Funktionsprinzip der Planetenkugelmühle (Quelle ECG)	31
Abbildung 26:	Aufschluss nach $t_1$ (Quelle ECG)	
Abbildung 27:	Aufschluss nach $t_2$ (Quelle ECG)	31
Abbildung 28	Aufschluss nach $t_3$ (Quelle ECG)	
Abbildung 29:	Aufschluss nach $t_4$ (Quelle ECG)	31
Abbildung 30	Systemgrenzen der Autosredderroute	34
Abbildung 31	Systemgrenzen der Elektrorecyclingroute	34
Abbildung 32	Systemgrenzen der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung	34
Abbildung 33	Ergebnisse für die Wirkungskategorie Klimaerwärmungspotential für die Elektrorecyclingroute, bezogen auf 1 t Leistungselektronik	36



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Arbeitspakete und Partner	11
Tabelle 2	Durchschnittliche Zusammensetzung der Leistungselektronik	17
Tabelle 3	Durchschnittlicher Metallgehalt der Platinen	18
Tabelle 4	Durchschnittliche stoffliche Zusammensetzung der Leistungselektronik	18
Tabelle 5	Ökonomische Bilanzierung der Autoshredderroute, bezogen auf 1 t Leistungselektronik	37
Tabelle 6	Ökonomische Bilanzierung der Elektrorecyclingroute, bezogen auf 1 t Leistungs-elektronik	37
Tabelle 7	Ökonomische Bilanzierung der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinenentstückung, bezogen auf 1 t Leistungselektronik	38



## 1. Zusammenfassung

Im Projekt ElmoReL 2020 wurde eine optimierte Recyclingroute für die Verwertung von Leistungselektronikmodulen aus E-Fahrzeugen entwickelt, die auch im Serienbetrieb gut anwendbar und mit standardisierter Technologie umzusetzen ist. Diese Route sieht einen Ausbau der Leistungselektronik aus dem Fahrzeug und eine nachfolgende Verwertung bei einem Elektroaltgeräterecycler vor. Die Zerkleinerung des Leistungselektronikmoduls mit einem robusten Aluminiumgehäuse erfolgt in einer Prallmühle, mit der es gelingt, neben anderen Fraktionen große und weitgehend intakte Leiterplattenstücke zu erzeugen, die dann in die standardmäßige Aufbereitungstechnologie von Elektroaltgeräterecyclern eingespeist werden können. Günstig ist auch, dass die Prallmühle wenig Staub erzeugt, in dem strategische Metalle für eine weitere wirtschaftliche Verwertung möglicherweise verloren gehen würden. Im Vergleich zum Autoshreder können mit dieser Recyclingroute hohe Rückgewinnungsquoten für Gold, Silber und Palladium realisiert werden. Auch können die Rückgewinnungsquoten von Zinn und Kupfer etwas angehoben werden.

Das Verwertungsverfahren ist bei den jetzigen Rahmenbedingungen und Rohstoffpreisen wirtschaftlich, auch wenn es mit deutlich höheren Kosten als die Verwertung über den Autoshreder verbunden ist. Die Ökobilanz zeigt grundsätzlich gute Ergebnisse sowohl für die Autoshrederroute als auch die Elektrorecyclingroute; bei letzterer kommen durch partiell höhere Rückgewinnungsquoten jedoch noch Vorteile durch entsprechende Gutschriften hinzu.

Weiterhin wurden in ElmoReL Versuche zur chemischen Platinentstückung durchgeführt. Das Ziel war vor allem, die tantalhaltigen Kondensatoren auf diesem Wege abzutrennen und auch das Tantal, das bisher nicht verwertet wird, einer Verwertung zuzuführen. Die Versuche und die darauf aufbauenden Abschätzungen haben jedoch gezeigt, dass dieser Verfahrensweg nicht empfehlenswert ist. Aus ökobilanzieller Sicht verspricht die chemischen Platinentstückung keine relevanten Vorteile, da einer zusätzlichen Tantalrückgewinnung entsprechende Aufwendungen für die eingesetzten Chemikalien gegenüberstehen. Die Kostenschätzungen zeigen zwar ein leicht positives Ergebnis, sind aber mit sehr hohen Unsicherheiten belegt.

## 2. Zielstellung und Beschreibung des Vorhabens

Die Zukunft der individuellen Mobilität mittels PKW in Deutschland hat seit der UN-Klimakonferenz 2015 in Paris und dem im November 2016 vorgestellten Klimaschutzplan 2050 eine feste Zielrichtung. Um die vorgegebenen ambitionierten Treibhausgasreduktionsziele im Mobilitätssektor von 42 % von 1990 bis 2030 zu erreichen [BMUB 2016], müssen treibhausgasneutrale Technologien deutlich ausgebaut werden. Eine tragende Rolle wird hier die Elektromobilität spielen, und es ist ein künftiger deutlicher Anstieg des Absatzes an Elektrofahrzeugen zu erwarten. Damit verbunden wird zeitversetzt das Aufkommen an zu recycelnden Elektrofahrzeugen ansteigen. Dies beinhaltet auch die zu verwertenden Leistungselektronikmodule, die in jedem Elektrofahrzeug als wichtiges Bauteil für das Energiemanagement eingesetzt werden.

In der Vergangenheit ist bereits die Anzahl der Elektronikkomponenten in Fahrzeugen durch den zunehmenden Einsatz von Unterhaltselektronik, Bordcomputern und anderem angestiegen. Da die Zunahme der Elektronik in PKW bei den derzeitigen Verwertungsrouten mittels Autoshrredder und Post-shredder mit zunehmenden absoluten Verlusten an strategischen Metallen verbunden ist, wurden bereits Forschungsvorhaben mit Demontageversuchen durchgeführt [Kohlmeyer 2015]. Die Fragestellung ist, ob eine Demontage der Elektronik vor der Aufgabe der Fahrzeuge in den Autoshrredder verbunden mit der weiteren Verwertung der Elektronik in speziellen Elektronikrecyclinganlagen zu höheren Rückgewinnungsquoten von strategischen Metallen führt und ob dies auch ökonomisch darstellbar ist. Ein wesentliches ökonomisches Hindernis sind oft die hohen Kosten für den Ausbau der kleinen und an verschiedenen Stellen verbauten Komponenten.

Mit der Leistungselektronik wird eine zusätzliche Elektronikkomponente in Fahrzeugen verbaut, die sich im Gegensatz zu vielen kleineren Elektronikbauteilen durch ein höheres Gewicht und eine häufig gute Zugänglichkeit zur Demontage auszeichnet. Aus diesem Grunde untersucht das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderte Projekt „Elektrofahrzeugrecycling 2020 – Schlüsselkomponente Leistungselektronik“ (ElmoReL 2020) die Optimierung des Recyclings der Leistungselektronik mittels Demontage und abgestimmter mechanischer und chemischer Aufbereitungstechniken, die hohe Rückgewinnungsquoten auch für strategische Metalle ermöglichen. Neben dem Recycling der in der Leistungselektronik enthaltenen Massenmetalle wie Aluminium, Eisen und Kupfer stehen vor allem Verfahren zur Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen für die Elektromobilität im Vordergrund. Hiermit soll ein möglicher Beitrag zu einer nachhaltigen Versorgung Deutschlands mit strategisch wichtigen Metallen aufgezeigt werden. Die Ökobilanz dient zur Bewertung der untersuchten Verfahren für das Recycling der Leistungselektronik.

Das Projekt ElmoReL 2020 wurde zwischen Dezember 2013 und November 2016 unter der Koordination des Öko-Instituts mit den Verbundpartnern Electrocycling GmbH, TU Clausthal, Volkswagen AG und PPM Pure Metals GmbH durchgeführt. Nach den Vorgängerprojekten zum Recycling von Elektrofahrzeugkomponenten, die sich zum einen mit dem Recycling von Batterien (LiBRi [Buchert 2011a], LithoRec I [Buchert 2011b], LithoRec II [Buchert 2015a], EcoBatRec [Buchert 2015b]) und zum anderen mit elektrischen Fahrantrieben (MORE [Siemens 2014]) beschäftigt haben, beleuchtet dieses Projekt die dritte wichtige Komponente von Elektrofahrzeugen.

### 3. Struktur des Projekts und Zusammenarbeit der Partner

Die folgende Graphik gibt einen Überblick über die Arbeitspakete.

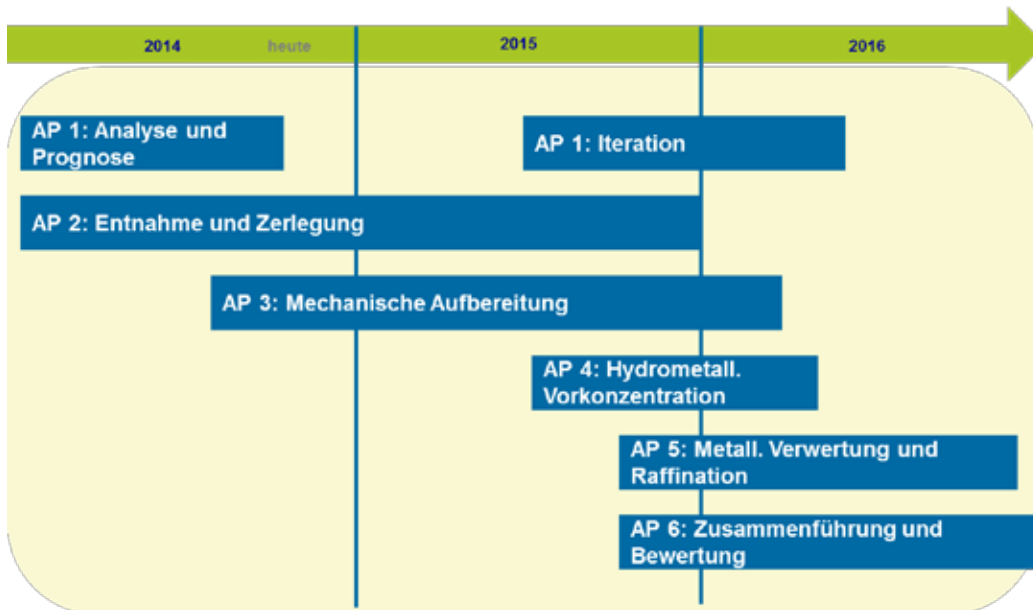


Abbildung 1 Arbeitspakete und Zeitplan

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Aufgaben innerhalb der Arbeitspakete und die jeweils beteiligten Partner. Die Arbeitspakete spiegeln den Stand bei Projektbeginn wieder. Da sich im Projektverlauf gezeigt hat, dass AP 4.4 und AP 5 bei der konzeptionierten Recyclingroute nicht entwickelt werden müssen, sind diese mit dem Vermerk „entfallen“ eingetragen.

Tabelle 1 Arbeitspakete und Partner

AP und Tasks		Partner
<b>AP 1</b>	<b>Analyse und Prognose</b>	
Task 1	Recherche bei Herstellern	Öko, IFAD, VW
Task 2	Vollscreenanalyse chemische Elemente	IFAD
Task 3	Rückschlüsse zur Adaption der Produktion von Ga, In, Ge	PPM
Task 4	Iteration von Task 1-3	Öko, IFAD, VW, PPM
<b>AP 2</b>	<b>Entnahme und Zerlegung</b>	
Task 1	Demontage der Leistungselektronik und Dokumentation	VW
Task 2	Entwicklung und Aufbau geeigneter Zerlegeplätze und Werkzeuge	- entfallen -
Task 3	Zielgerichtete Zerlegung der demontierten Leistungselektronik	ECG

<b>AP 3</b>	<b>Mechanische Aufbereitung</b>	
Task 1	Durchführung von Versuchsreihen mit verschiedenen mechanischen Zerkleinerungsverfahren	ECG, IFAD
Task 2	Durchführung von Versuchsreihen mit verschiedenen Sortierverfahren und analytischer Überprüfung des Ausbringen der Zielmetalle	ECG, IFAD
Task 3	Gesamtgestaltung der mechanischen Aufbereitungsstufe	ECG, IFAD
<b>AP 4</b>	<b>Hydrometallurgische Vorkonzentration</b>	
Task 1	Durchführung von Laugeversuchen	IFAD
Task 2	Fest-Flüssigtrennung	IFAD
Task 3	Aufkonzentration und Separation von Zielmetallen aus verdünnten Laugelösungen	IFAD
Task 4	Strippen und Abscheiden von aufkonzentrierten Zielmetallen aus Trägerlösungen und Desorption aus Ionentauschern	- entfallen -
<b>AP 5</b>	<b>Metallurgische Verwertung und Raffination</b>	
Task 1	Untersuchungen zur Adaption der vorhandenen Recyclingprozesse	- entfallen -
Task 2	Gestaltung eines optimierten Vortrennungsprozesses	- entfallen -
Task 3	Überprüfung der Eignung der vorhandenen Hochreinigungsprozesse auf die hergestellten Rohmetalle	- entfallen -
<b>AP 6</b>	<b>Zusammenführung und Bewertung der Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete</b>	
Task 1	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	Öko und Partner
Task 2	Sachbilanz und Wirkungsabschätzung	Öko und Partner
Task 3	Auswertung und Interpretation der Ökobilanzergebnisse	Öko und Partner
Task 4	Sensitivitätsanalysen	Öko und Partner
Task 5	Orientierende ökonomische Abschätzung des Recyclingweges	Alle

## 4. Ausgangssituation und Entwicklungsbedarf

### 4.1. Stand der Technik und Trends in der LE

#### Bearbeitung durch Öko-Institut und PPM

Die Leistungselektronik transformiert die aus der Batterie kommende Energie und stellt diese dem Motor in der benötigten Form zur Verfügung. Sie ist eine Schlüsselkomponente von Elektrofahrzeugen und hat einen hohen Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs. Die Leistungselektronik erfüllt hierfür verschiedene Funktionen und besteht aus folgenden Teilen [Bauer 2015]:

- Der Inverter wandelt den Gleichstrom der Batterie in Wechselstrom für den E-Motor um.
- Der DC-DC-Wandler (DC: direct current = Gleichstrom) versorgt das Bordnetz mit Niederspannung.
- Einige Fahrzeuge haben einen zusätzlichen DC-Wandler, der die Batteriespannung noch vor dem Inverter auf eine höhere Spannung transformiert.
- Die Leistungselektronik enthält auch Leiterplatten mit Steuerungselektronik.
- Darüber hinaus benötigen E-Fahrzeuge ein Ladegerät für das Aufladen der Batterie. Das Ladegerät ist meist nicht Teil des Leistungselektronikmoduls, aber grundsätzlich auch für dieselben Verwertungsrouten interessant.

Wichtige aktuelle Forschungsthemen sind der Einsatz von neuen Materialien und Bauweisen mit dem Ziel, die Energieeffizienz zu steigern und das Gewicht zu reduzieren.

#### 4.1.1. Silizium-Carbid und Gallium-Nitrid als neue Leistungshalbleiter

Ein F&E-Schwerpunkt ist die Entwicklung von neuen Halbleitermaterialien wie Siliziumcarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) in den Leistungschips anstelle des derzeit verwendeten Siliziums. Beide neuen Halbleitermaterialien ermöglichen den Betrieb der Leistungschips mit einer höheren Energieeffizienz, höheren Frequenzen und höheren Temperaturen. Dies wiederum ermöglicht die Miniaturisierung der Leistungselektronikmodule. Damit ergeben sich als potentielle Verbesserungen höhere Fahrzeugreichweiten bzw. kleinere Batterien, weniger Abwärme und weniger Kühlaufwand sowie kleinere Induktoren. Das Potential von Galliumnitrid hat sich beim Google-Wettbewerb „Lilac Box Challenge“ um einen Wechselrichter mit höchster Leistungsdichte und kleinstem Volumen gezeigt. Ein GaN System hat den Wettbewerb in 2016 mit GaN-Transistoren gewonnen [semiconductor 2016].

Eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz von Chips mit einer höheren Leistungsdichte und einer höheren Temperaturbeständigkeit ist jedoch, dass die Bauteile in der Peripherie den höheren Temperaturen von rund 120 °C anstatt der bisherigen 80 °C standhalten. Die heute üblichen Lötinnlegierungen und Kondensatoren können diese Anforderung nicht erfüllen. Darum wird auch an temperaturresistenteren Kondensatoren, z.B. Keramikkondensatoren, oder verbesserten Kühlsystemen gearbeitet. Im Bereich der Verbindungstechnik geht der Trend zum Sintern mit Silber anstelle von Löten [Schüler 2015] [Grasshoff 2011].

Nach ausführlicher Recherche und Fachgesprächen kann davon ausgegangen werden, dass SiC und GaN in den nächsten 5 – 15 Jahren auch in der Leistungselektronik von Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen werden [Schüler 2015]. Hierbei ist die SiC-Technologie derzeit weiter entwickelt und schon in einer ersten Leistungselektronik-Anwendung für Fahrzeugantriebe [Deinhardt 2017], während GaN bisher noch in Pilotanwendungen bzw. vereinzelt Produkten

außerhalb der Leistungselektronik verwendet wird. Da GaN-Chips jedoch perspektivisch günstiger zu produzieren sind, haben sie grundsätzlich ein hohes Marktpotential.

Während SiC aus ökonomischen Gründen nicht für das Recycling interessant ist, wird das viel teurere Gallium aus anderen Produktionsabfällen bereits recycelt [Kammer 2012]. Vor diesem Hintergrund zeigt die nachfolgende Auflistung beispielhaft den aktuellen Einsatz von GaN-Leistungsmodulen in der Praxis, vorerst in Anwendungen mit kleineren Leistungen:

- Panasonic Power Module mit GaN werden seit 2014 für IT-Stromversorgungen verwendet. Der Einsatz im automotive sector ist später geplant.
- GaN-Chips von Transphorm werden derzeit im PKW in der IT bzw. Unterhaltselektronik eingesetzt. Die Vorteile liegen im geringeren Gewicht und den kompakteren Abmessungen.
- GaN Systems strebt den Einsatz von GaN-chips in onboard Ladegeräten an. Eine Motivation sind hier die realisierbaren kleinen Volumina.

Eine erste Überschlagsrechnung zu den potentiellen Gallium-Mengen in der Leistungselektronik geht von einer dünnen Galliumnitridschicht von rund 5 nm aus. Die Leistungselektronik eines Fahrzeugs wird dann rund 300 mg GaN enthalten. Die Weltproduktion lag in 2012 bei 283 t und entspricht dem theoretischen Galliumbedarf von 1 Milliarde E-Fahrzeuge. 20 Mio. E-Fahrzeuge würden damit ~ 2% der aktuellen Gallium-Weltproduktion benötigen.

#### **4.1.2. Weitere Bauelemente**

Die derzeitigen großen Folien- oder Keramikkondensatoren bieten aus jetziger Sicht kein interessantes Ressourceneffizienzpotential. Hingegen sind die kleinen Tantalkondensatoren, die auf den Steuerungsplatinen enthalten sind, ein interessantes Potential, da sie rund 40 % Tantal enthalten. Im herkömmlichen Elektronikrecycling gehen sie derzeit verloren, da sie nicht im Vorfeld vor der pyrometallurgischen Behandlung abgetrennt werden und das Tantal in die Schlacke eingebunden wird.

In den Bereichen Kühlung, Gehäuse, Aufbau- und Verbindungstechnik wird es zu Materialverschiebungen kommen. So wird perspektivisch mehr gesintert werden als gelötet. Die Gehäuse bzw. Kühlungen werden tendenziell kleiner. Bereits über den Projektverlauf haben die Analysen von verschiedenen Leistungselektronikmodulen gezeigt, dass neuere Modelle mit leichteren Gehäusen ausgestattet wurden. Zudem werden perspektivisch eventuell neue Kühlkonzepte mit Spezialkeramiken eingesetzt werden [Schüler 2015].

#### **4.1.3. Ansätze zur Dezentralisierung der Leistungselektronik**

Derzeit befindet sich die Leistungselektronik in den meisten Fahrzeugen in einem zentralen Modul und es ist davon auszugehen, dass dies auch im nächsten Jahrzehnt die Standardbauweise sein wird. Jedoch wird auch intensiv an alternativen Konzepten mit unterschiedlichen Dezentralisierungsgraden gearbeitet. Es gibt Konzepte, die Leistungselektronik aufzuteilen und als Einzelmodule an den Rädern anzubringen. Auch gibt es bereits Prototypen, bei denen die Leistungselektronik in den Motor integriert ist [Fraunhofer IISB 2013]. Diese Konzepte zielen auf weitere Verbesserungen hinsichtlich der Fahrzeugsteuerung, der Energieeffizienz und der Gewichtsreduktion. Vor einer breiten Anwendung müssen jedoch noch zahlreiche technologische Herausforderungen bezüglich mechanischer Stabilität, Temperaturverträglichkeit und der anspruchsvollen Produktionstechnologie überwunden werden [Schüler 2015].

#### 4.1.4. Fazit

Zusammenfassend ist davon auszugehen, dass der Großteil der E-Fahrzeuge weiterhin mit zentralen Leistungselektronikmodulen ausgestattet sein wird. Die Materialzusammensetzung kann sich jedoch bei Neuentwicklungen in der Chip-, Kühl- und Verbindungstechnik in begrenztem Maße ändern. Es werden deshalb Recyclingkonzepte benötigt, die eine gewisse Flexibilität aufweisen. Auch ist es wahrscheinlich, dass die Materialeffizienz steigen und die Leistungselektronik pro kW leichter werden wird. Vor allem ist eine Reduktion der Aluminiummasse im Bereich von Gehäuse und Kühlung zu erwarten. Im Gegensatz dazu ist auch denkbar, dass diese Materialgewinne durch höhere Gesamtleistungen aufgrund steigender Kundenansprüche kompensiert werden.

### 4.2. Stand der Technik beim Recycling von LE

#### Bearbeitung durch VW, ECG und IFAD

##### 4.2.1. Altfahrzeugrecycling

Stand der Technik beim Recycling von Altfahrzeugen ist der Autoshreder mit nachgeschaltetem Postshredder wie in Abbildung 2 dargestellt. Dies gilt auch für Elektrofahrzeuge, die nach dem Freischalten des Fahrzeugs und dem Ausbau bestimmter Komponenten, allen voran der Batterie, ebenfalls dem Shredder zugeführt werden. Ein Ausbau der Leistungselektronik erfolgt derzeit nicht unbedingt, da dieses Bauteil mit einem Gewicht von 10 kg oder mehr auch gemeinsam mit dem gesamten Fahrzeug verwertet werden kann.

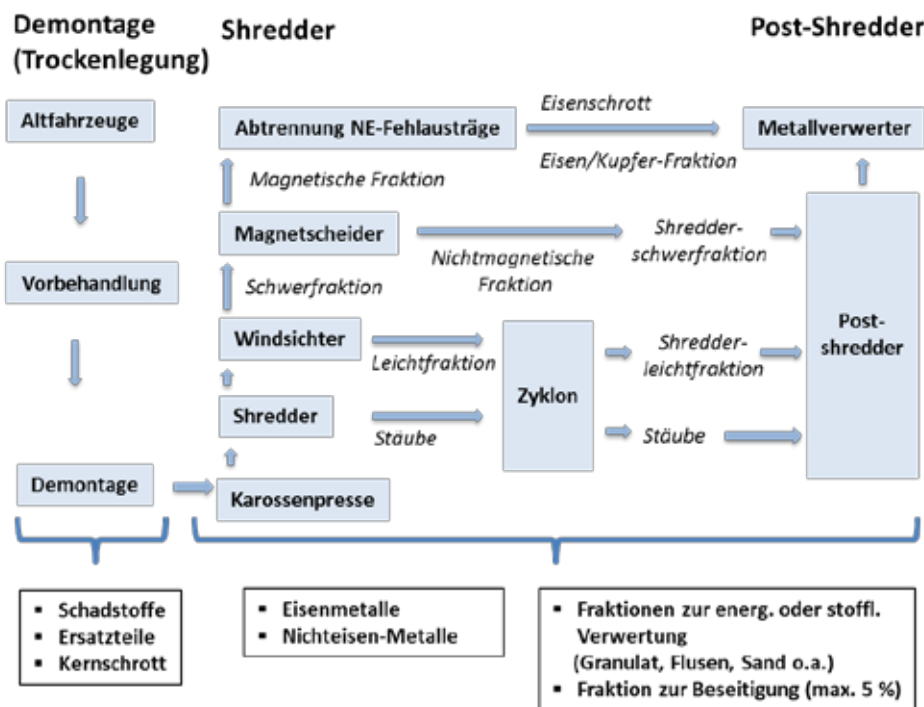


Abbildung 2 Übliche Recyclingroute für Altfahrzeuge

Im ersten Schritt des Recyclings erfolgt eine Vorbehandlung. Hier werden alle Betriebsflüssigkeiten (z.B. Motoröl, Kraftstoff, Bremsflüssigkeit) entfernt, die Pyrotechnik der Airbags entschärft und bestimmte Bauteile (z.B. Batterie) entnommen. Im nächsten Schritt, der Demontage, werden Teile zur Wiederverwendung (z.B. Motoren, Scheinwerfer) und Teile mit besonders wertvollen

Werkstoffen (z.B. Katalysatoren) ausgebaut. Die übrig bleibende Restkarosserie wird gepresst und anschließend geshreddert. Es folgt eine Sortierung der Fraktionen über Windsichter, Magnetscheider, Zyklon und weitere Trennstufen. Hieraus resultieren Eisenschrott und eine Eisen/Kupferfraktion, welche den Metallverwertern zugeführt werden. Die übrigen Ströme, also die Shredderschwerfraktion, die Shredderleichtfraktion sowie die Stäube werden einer Postshredderanlage zugeführt. In der Postshredderanlage werden die Eingangsströme über weitere Sortier- und Trennstufen immer feiner aufgetrennt um die resultierenden Fraktionen dem Recycling zuführen zu können.

Die einzelnen Teile der Leistungselektronik gelangen ebenfalls in die oben genannten Fraktionen. Beispielsweise gelangt das Aluminiumgehäuse in die korrespondierende NE-Metallfraktion. Die Edelmetalle, welche sich vor allem auf den Platinen finden, verteilen sich über die verschiedenen Fraktionen, reichern sich aber vor allem in der Shredderleichtfraktion an [Widmer 2015], von wo sie nur schwer rückgewinnbar sind.

#### **4.2.2. Elektronikrecycling**

Elektroaltgeräterecycler verwerten eine große Bandbreite an WEEE-Abfällen (WEEE: Waste of Electrical and Electronic Equipment = Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall). Hierzu stehen eine Vielzahl an mechanischen Aufbereitungsverfahren wie Hammerbrecher und Hammermühlen, Rotorscheren, Querstromzersetzer, Magnetseparatoren, Wirbelstromscheider, Trennmechanismen auf Rinnen und Herden bis hin zu modernen sensorgestützten Sortiermaschinen zur Verfügung. Mittels der mechanischen Aufbereitung werden ähnlich wie beim Autoschredder bzw. Postshredder eine Vielzahl von Fraktionen erzeugt, die zur weiteren Verwertung an Metallhütten, zum Kunststoffrecycling oder in die energetische Verwertung abgegeben werden.

Bedingt durch die spezifische Zusammensetzung des Elektroaltgeräte-Schrotts liegt im Gegensatz zum Auto- und Postshredder beim Elektroaltgeräterecycling ein besonderes Augenmerk auf hohen Rückgewinnungsquoten für enthaltene Edelmetalle wie Gold, Silber und Palladium, die insbesondere in den elektronischen Bauteilen auf den Platinen enthalten sind. Die edelmetallhaltigen Fraktionen werden nach der mechanischen Aufbereitung in pyrometallurgischen Anlagen verwertet, die diese Metalle abscheiden können. Dies sind beispielsweise Sekundärkupferhütten oder spezielle Anlagen zur Raffination von Fraktionen aus der Elektroaltgeräteaufbereitung.

Unedlere Metalle gelangen in diesen Anlagen i. d. R. in die Schlacken und Flugstäube, wo sie aufgrund hoher Verdünnung nicht wirtschaftlich rückgewinnbar sind. Beispiele sind Tantal, Gallium und Germanium [Van Shaik 2014]. Um solche Metalle aus Platinen zurückzugewinnen, ist eine gezielte Abtrennung und Aussortierung der Bauelemente zur Zuführung zu spezifischen Recyclingverfahren notwendig. Hierzu wurden in den letzten Jahren verschiedene Ansätze, insbesondere zur Gewinnung von Tantalkondensatoren, untersucht. Beispiele sind die Gewinnung von Tantalkondensatoren aus KFZ-Steuergeräten mittels mechanischer Aufbereitung [Römer 2016], die automatisierte Abtrennung von Leiterplatten mittels Robotern [Kreibe 2016], Ablösen sowie die händische Demontage. Keiner der Ansätze wurde bisher industriell umgesetzt.



## 5. Wissenschaftliche und technische Arbeitsergebnisse des Vorhabens

### 5.1. Analytik der Leistungselektronik

#### Bearbeitung durch IFAD, ECG und VW

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden durch die Partner Electroycling und TU Clausthal ca. 15 Leistungselektronikeinheiten demontiert, um ihre stoffliche Zusammensetzung und den Demontageaufwand zu bestimmen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine manuelle Demontage prinzipiell möglich, aber zu zeitaufwendig für eine wirtschaftliche Umsetzung ist. Der Aufbau und die stoffliche Zusammensetzung der Einheiten sind ähnlich, allerdings variierten die Gewichte zwischen knapp 10 und gut 20 kg. In Tabelle 2 ist die durchschnittliche Zusammensetzung der untersuchten Leistungselektroniken dargestellt. Die größte Masse weist das Aluminiumgehäuse auf. Der Folienkondensator hat einen weiteren großen Gewichtsanteil und ist das größte Bauteil innerhalb der Leistungselektronik. Die wertvollen Metalle wie Gold, Silber und Palladium, sowie die Sondermetalle wie Zinn und Tantal finden sich in den 5 % der Platinen, wobei nur ein Teil der Platinen Tantalkondensatoren enthält und einige Hersteller auf Tantalkondensatoren vollständig verzichten.

**Tabelle 2** Durchschnittliche Zusammensetzung der Leistungselektronik

Stoff/Bauteil	Anteil
Aluminium	56,1 %
Eisen	8,1 %
Kupfer inkl. Messing	8,7 %
Kunststoffe	5,8 %
Kondensatoren	13,9 %
Platinen	5,0 %
Kabel und Stecker	1,9 %
Sonstiges	0,5 %

Die oben genannten Platinen wurden in einem separaten Schritt auf ihren Metallgehalt hin untersucht. In Tabelle 3 ist der durchschnittliche Metallgehalt der untersuchten Platinen dargestellt. Wie zu sehen ist, ist Kupfer die Hauptfraktion während Zinn im einstelligen Prozentbereich vorhanden ist. Das Hauptaugenmerk für das Recycling liegt aber auf den Edelmetallen Gold, Silber und Palladium, die nur in geringem Maß vorhanden sind.

**Tabelle 3**      **Durchschnittlicher Metallgehalt der Platinen**

<b>Metall</b>	<b>Anteil</b>
Kupfer	27,6 %
Zinn	2,2 %
Gold	0,018 %
Silber	0,063 %
Palladium	0,003 %
Tantal	0,024 %
Niob	0,002 %
Antimon	0,057 %

Wenn man die durchschnittliche Zusammensetzung der Leistungselektronik mit dem durchschnittlichen Metallgehalt der Platinen kombiniert, erhält man die in Tabelle 4 dargestellte durchschnittliche stoffliche Zusammensetzung der Leistungselektronik, auf deren Basis die ökologischen und ökonomischen Betrachtungen zur Rückgewinnung durchgeführt wurden.

**Tabelle 4**      **Durchschnittliche stoffliche Zusammensetzung der Leistungselektronik**

<b>Stoff</b>	<b>Anteil</b>
Aluminium	58,1 %
Eisen	8,9 %
Kupfer	12,3 %
Zinn	0,11 %
Gold	0,0009 %
Silber	0,0032 %
Palladium	0,00015 %
Tantal	0,0012 %
Niob	0,0001 %
Antimon	0,029 %
Kunststoff	18,6 %
Sonstiges	1,95 %

## 5.2. Entwicklung einer Recyclingroute für die Leistungselektronik mit optimierter mechanischer Aufbereitungstechnik

### Bearbeitung durch VW

#### 5.2.1. Demontage

Im Auftrag der Volkswagen AG hat die FIT GmbH die Demontage der Leistungselektronik für 58 Fahrzeugmodelle von 22 Herstellern untersucht. Dies entspricht mehr als 95 % der im ersten Halbjahr 2015 in Deutschland angebotenen elektrifizierten Fahrzeugmodelle. Es wurden die Zugänglichkeit und die Ausbaubarkeit der Leistungselektronik untersucht. Dazu wurden verschiedene Datenquellen genutzt, weshalb die ermittelten Ausbauzeiten unterschiedliche Genauigkeiten/Qualitäten aufweisen. Als „gut“ (belastbar) eingestuft wurden Ausbauzeiten, die aus Reparaturleitfäden oder aus von der FIT GmbH selbst durchgeführten Demontageanalysen stammen. Zusätzlich wurden auch die aus sehr detaillierten Bilddokumentationen abgeleiteten Ausbauzeiten als gut eingestuft (Abbildung 3).



- Analyse in WMS II
- Übernahme aller xTime Teilarbeiten und Parameter
  - Leistungselektronik / Kühlmittelschlauch lösen
  - Leistungselektronik / Kühlmittelschlauch lösen
  - Leistungselektronik / Hochvoltleitungen lösen
  - Leistungselektronik / Hochvoltleitungen HV-Batterie lösen
  - Leistungselektronik / Leitungssatz Batterie + lösen
  - Leistungselektronik / Massekabel lösen
  - Leistungselektronik / Leitungssatz lösen

- Parametersplitt „nur Ausbau“
- Angenommene Rüst- und Verteilzeit von 25%

**10,3 min + 25%**

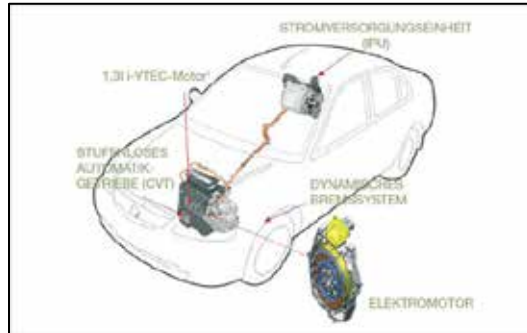
**Abbildung 3 Gutes Bildmaterial aus Reparaturleitfaden**

Als „mittel“ (noch belastbar) wurden Ausbauzeiten eingestuft, wenn das vorliegende Bildmaterial die Einbaulage der Leistungselektronik gut beschreibt Abbildung 4. Dies traf für die überwiegende Anzahl der Fahrzeugmodelle zu.



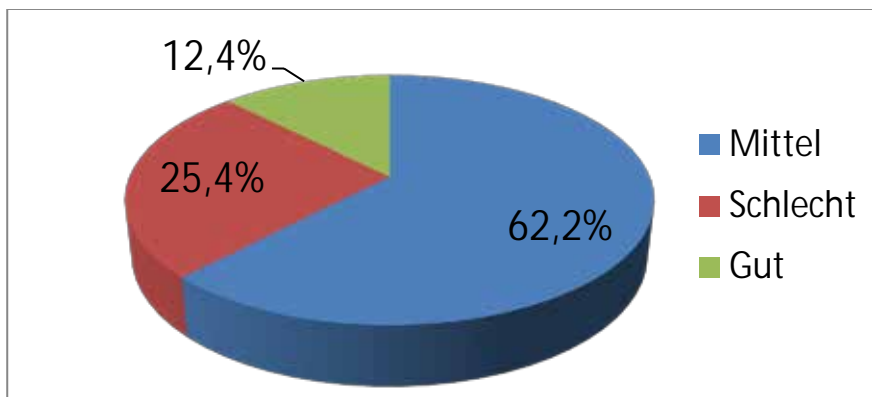
#### Abbildung 4 Bildmaterial, das die Einbaulage der Leistungselektronik gut beschreibt

Bei unzureichendem Bildmaterial oder systemtechnischen Bebilderungen konnten die Ausbauezeiten der Leistungselektronik nur grob geschätzt werden (Beispiel Abbildung 5). Auf diese Weise ermittelte Ausbauezeiten haben wenig Aussagekraft. Ihnen wurde das Qualitätsmerkmal „schlecht“ zugeteilt.



#### Abbildung 5 Bildmaterial, das nur grobe Schätzungen der Ausbauezeiten zulässt

Insgesamt wurde die Aussagekraft der ermittelten Demontagezeiten bei etwa 75 % der betrachteten Fahrzeugmodelle mit „gut“ oder „mittel“ bewertet (Abbildung 6). Diese Demontagezeiten sind als belastbar anzusehen.



#### Abbildung 6 Aussagekraft der ermittelten Ausbauezeiten

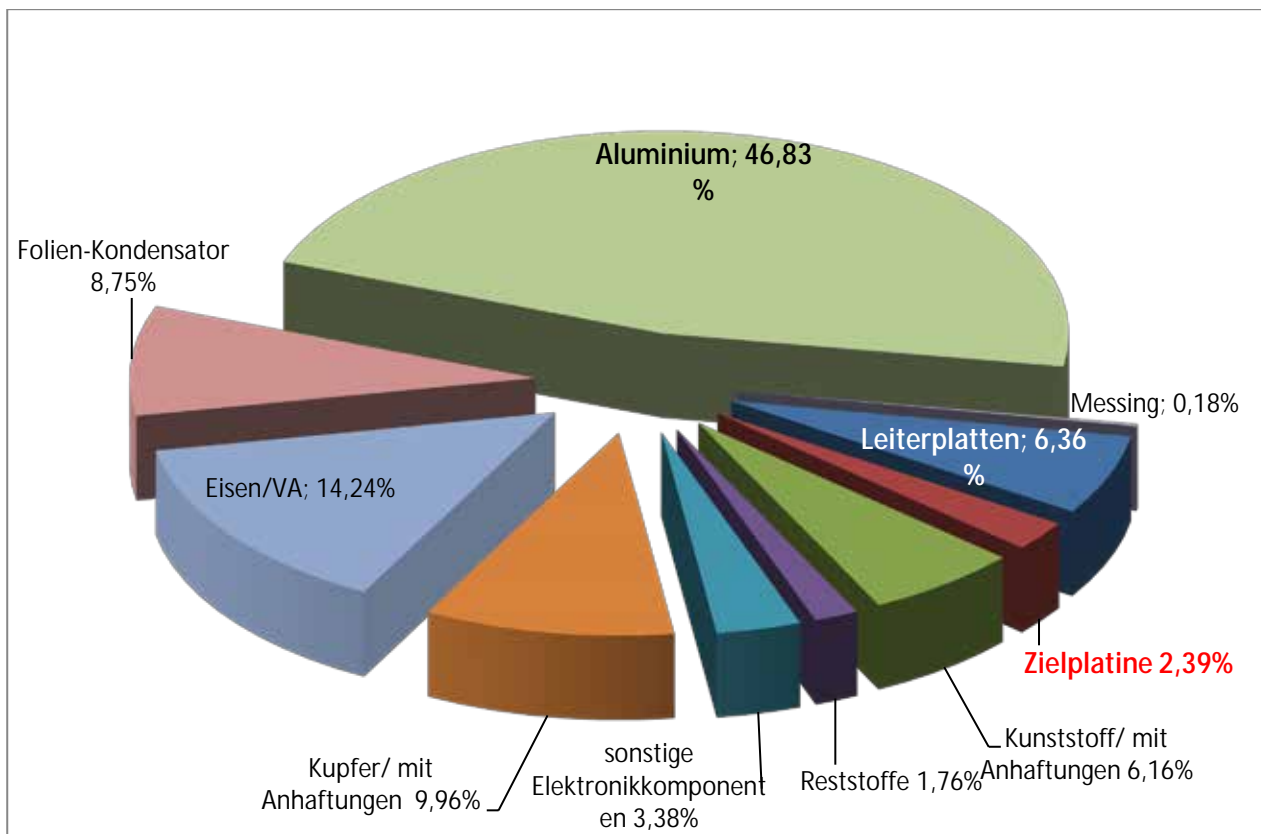
Die ermittelten Ausbauezeiten lagen zwischen minimal 5 Minuten und maximal 60 Minuten. Der Maximalwert von 60 Minuten trat nur bei einigen Hybridfahrzeugen auf, bei denen die Leistungselektronik aufgrund des vorhandenen Verbrennungsmotors schlecht zugänglich ist. Diese Fahrzeugmodelle wurden bei der arithmetischen Mittelwertbildung für die Demontagezeit vernachlässigt. Für die meisten Fahrzeuge lagen die Ausbauezeiten zwischen 7 Minuten und 20 Minuten, woraus sich eine mittlere Demontagezeit von etwa 15 Minuten ergibt.

Die ermittelten Demontagezeiten beziehen sich ausschließlich auf den Ausbau der Leistungselektronik. Notwendige Vorarbeiten wie das Freischalten des Fahrzeugs sind nicht berücksichtigt. Ebenso unberücksichtigt bleiben aber auch mögliche Synergien, die durch den Ausbau der Leistungselektronik entstehen können (vereinfachte Demontage von weiteren Bauteilen, z.B. Antriebsmotor oder Kupferkabel). Setzt man einen Arbeitslohn von 30 €/h an so ergeben sich aus der ermittelten mittleren Demontagezeit durchschnittliche Arbeitskosten von etwa 7,50 € für die Demontage einer Leistungselektronik.

## 5.2.2. Zerlegung und mechanische Aufbereitung (ECG)

### Bearbeitung durch ECG

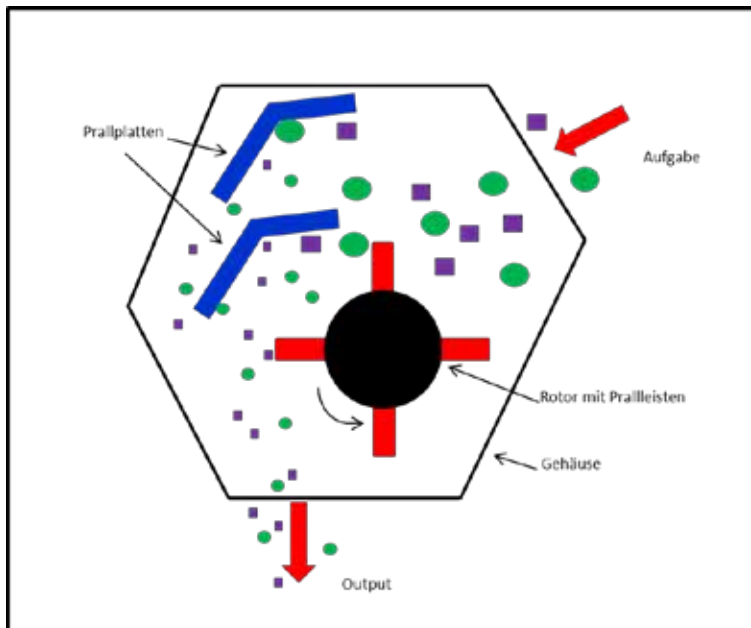
Im nächsten Schritt wurden mit den ausgebauten Leistungselektronikmodulen zuerst manuelle Zerlegeversuche durchgeführt. Die manuellen Zerlegeversuche dienten zur Analyse über Zusammensetzung aber vor allem Aufbau der Leistungselektronikkomponenten. Exemplarisch für die durchgeführten Zerlegungen zeigt Abbildung 7 die Zusammensetzung der untersuchten Leistungselektronikkomponenten.



**Abbildung 7** Zusammensetzung von Leistungselektronik nach manueller Zerlegung (Quelle ECG)

Auf Basis der Ergebnisse der manuellen Zerlegung wurden im Anschluss maschinelle Zerlegeversuche durchgeführt. Im ersten Versuch wurden kleine Mengen an Leistungselektronik der bestehenden mechanischen Aufbereitung der Electroycling GmbH zugeführt. Die hierbei erzeugten Fraktionen zeigten aber keine eindeutige Sortierfähigkeit, um das Ziel einer Separation Gallium-haltiger Bauteile zu erreichen. Diese Untersuchungen wurden eingestellt und werden hier auch nicht weiter dargestellt.

Ein weiterer Ansatz zur maschinellen Zerlegung war der Einsatz einer Prallmühle mit dem Ziel des groben Aufschlusses der Leistungselektronikkomponenten. Die eingesetzte Maschine, eine APS 1010 des Herstellers Hazemag, ist ursprünglich für die Aufbereitung von Erzen und Gesteinen konzipiert worden. Die Electroycling GmbH setzt diese Maschine für den groben Aufschluss von beispielweise kunststoffreichen Geräten ein, um beispielsweise Router aus der Telekommunikation in Elektronikbestandteile (Leiterplatten) und Kunststoffgehäuseteile zu trennen und sortierfähige Fraktionen zu erzeugen. Abbildung 8 zeigt die Wirkungsweise der Prallmühle.



**Abbildung 8 Aufbau und Wirkweise einer Prallmühle (Quelle ECG)**

Zu untersuchen war zunächst, ob der Energieeintrag durch die Prallmühle in die Leistungselektronikkomponenten hoch genug ist, um einen ausreichenden Aufschluss zu erreichen. Nach einer Reihe von Vorversuchen konnten geeignete Einstellparameter an der Prallmühle ermittelt werden. Die wichtigsten Parameter sind hier Rotorgeschwindigkeit und Anstellwinkel der Prallplatten.

Für die durchgeführten Versuche mit einer größeren Menge Aufgabematerial wurden folgende Einstellungen gewählt:

Frequenz am Motor:	45 Hz
Rotordrehzahl:	409,5 U/min
Umfangsgeschwindigkeit:	21,66 m/s

Die folgenden Bilder zeigen die Versuchsdurchführung und die erzeugten Fraktionen:



**Abbildung 9** Mitarbeiter am Sortierband nach der Prallmühlenbeanspruchung (Quelle ECG)



**Abbildung 10** Material auf Sortierband (Quelle ECG)



**Abbildung 11** Fraktion Aluminium mit Anhaftungen (Quelle ECG)



**Abbildung 12** Fraktion Leiterplatten (Quelle ECG)



**Abbildung 13** Fraktion Zielplatine (Quelle ECG)





**Abbildung 14** Fraktion Prozessoren (Quelle ECG)

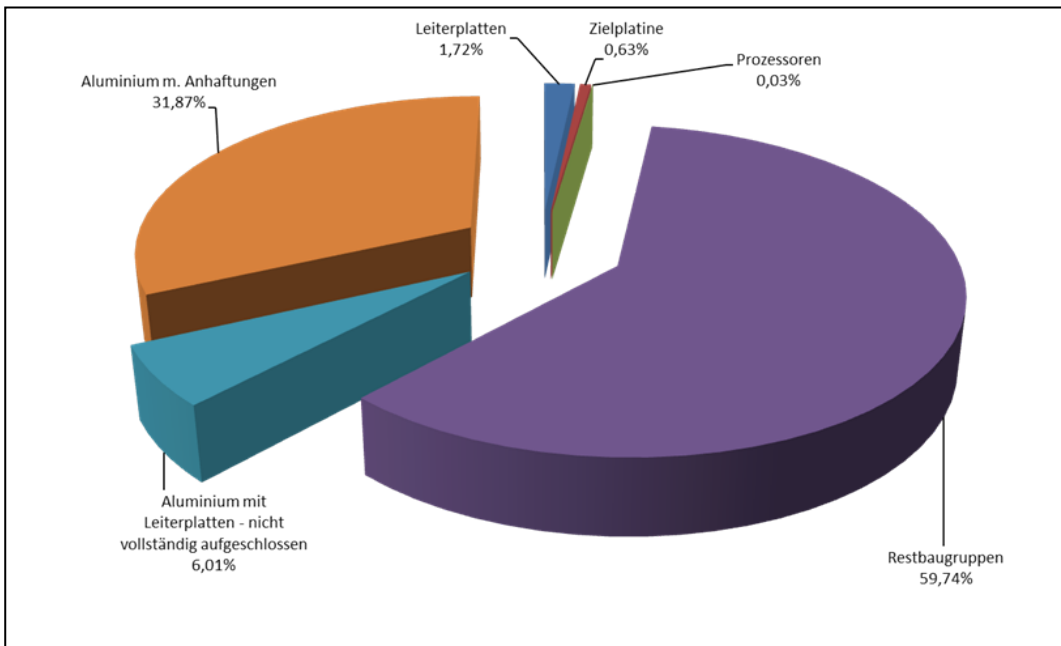


**Abbildung 15** Restfraktion zur weiteren Mechanischen Aufbereitung (Quelle ECG)



**Abbildung 16** Gehäusebestandteile ohne vollständigen Aufschluss – Wiederaufgabe (Quelle ECG)

Die Abbildung 17 zeigt die Massenverteilung der Produkte aus diesem Versuch.



**Abbildung 17 Massenverteilung der Fraktionen nach maschineller Zerlegung in der Prallmühle (Quelle ECG)**

Die vielversprechenden Ergebnisse wurden als praxistauglich angesehen, da die Zerlegung und die anschließende Sortierung über Standardaggregate durchgeführt werden können und der personelle Aufwand dem Rahmen der Recyclingindustrie entspricht. Die Leiterplattenfraktion, Hochleistungsplatine und sogar die Prozessoren lagen nach der Sortierung weitestgehend intakt und sortenrein vor, was eine direkte Weitergabe in etablierte Folgebehandlungsanlagen ermöglicht.

Sehr erfreulich ist die eindeutige Separierung der Hochleistungsplatine durch diesen Prozess. Als potentieller Träger für das Gallium kann diese Fraktion nun separat einer weiteren Aufbereitung mit dem Ziel weiterer Anreicherung zugeführt werden.

### 5.2.3. Aufkonzentration von Gallium aus den Leistungschips

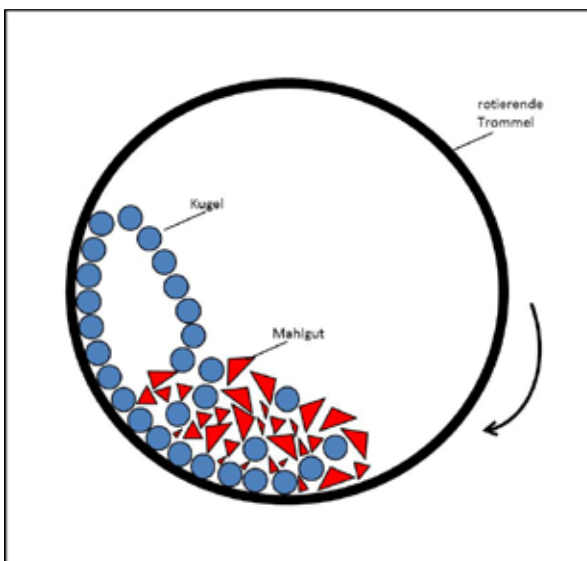
#### Bearbeitung durch IFAD und ECG

Betrachtet man die Hochleistungsplatine genauer, befinden sich auf einer Kupferplatte feine, dünne Strukturen. Diese Strukturen stellen die ggf. Gallium- haltigen Chips dar, welche als Aufgabenstellung im Projekt weiter anzureichern sind (siehe Abbildung 18).



**Abbildung 18 Hochleistungsplatine mit Chips-Struktur (Quelle ECG)**

Ein Ansatz zur Entfernung des Chip- Materials in einem mechanischen Aufbereitungsprozess kann das (Ab)-Mahlen der Chips von der Grundplatte aus Kupfer sein. Hierzu wurde in Versuchen ein Mahlverfahren in einer Mahlkörpermühle gewählt. Die klassische und verbreitete Anwendung ist die Kugelmühle. Hier handelt es sich um einen Zylinder, der neben dem Aufgabematerial mit Stahlkugeln unterschiedlichem Durchmesser gefüllt wird. Der Zylinder wird dann horizontal auf Rollen abgelegt, welche den Zylinder in eine Drehbewegung versetzen. Abbildung 19 zeigt die Arbeitsweise der Kugelmühle.



**Abbildung 19 Arbeitsweise der Kugelmühle –Kataraktbewegung (Quelle ECG)**

Die separierten Hochleistungsplatinen wurden gemeinsam mit den Mahlkörpern (Kugeln) in den Mahlraum gegeben, dieser verschlossen und auf den Antriebsrollen der Maschine positioniert (Abbildung 20).



**Abbildung 20** eingesetzte Mahlkörper – Kugeln verschiedener Durchmesser (Quelle ECG)



**Abbildung 21** eingesetzte Kugelmühle während des Versuches (Quelle ECG)

Eingestellte Parameter an der Kugelmühle:

Drehzahl am Motor: 55 U/min

Die eingestellte Geschwindigkeit und die gewählte Mahlkörperfüllung sind für die eingesetzte Mühle standardisiert. Es ist davon auszugehen, dass die Mahlkörperbewegung eine „Kataraktbewegung“ darstellt (s. Abbildung 19). Dabei fallen die Mahlkörper aus der rotierenden Bewegung im letzten Viertel der Kreisbewegung nach unten auf das zu zerkleinernde Material und sorgen so für eine Zerkleinerung bzw. den gewünschten Aufschluss.

Da zu Versuchsbeginn nicht bekannt war, wie sich die Hochleistungsplatinen bzw. deren Chips zerkleinern lassen, wurden die Laufzeiten der Kugelmühle nach Inaugenscheinnahme des Versuchsmaterials neu bestimmt. Der erste Durchgang wurde mit 5 min angesetzt.

Versuchsauswertung:

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Maschinenlaufzeit $t_1 = 5$ min:  | kaum bis gar kein Aufschluss   |
| Maschinenlaufzeit $t_2 = 10$ min: | geringfügig beginnender Aufschluss   |
| Maschinenlaufzeit $t_3 = 15$ min: | keine Verbesserung gegenüber $t_2$ - Aufschluss bleibt kaum sichtbar (s. Abbildung 22) |



**Abbildung 22 Hochleistungsplatinen in der Kugelmühle nach  $t_3$  (Quelle ECG)**

Der Versuch, die Chips von den Zielplatinen mittels Kugelmühlenbeanspruchung herunter zu mahlen, wurde abgebrochen. Der Energieeintrag des Verfahrens ist nicht ausreichend. Es muss eine Mahlung mit deutlich höherem Energieeintrag angewendet werden.

Um einen höheren Energieeintrag in einem Mahlkörperverfahren in das Aufgabematerial zu erreichen, wurde eine am IFAD zur Verfügung stehende Planetenkugelmühle eingesetzt (Abbildung 23).

Eingestellte Parameter an der Planetenkugelmühle:

- |                   |           |
|-------------------|-----------|
| Drehzahl:         | 206 U/min |
| Rotordurchmesser: | 420 mm    |
| Beschleunigung:   | 10 g      |



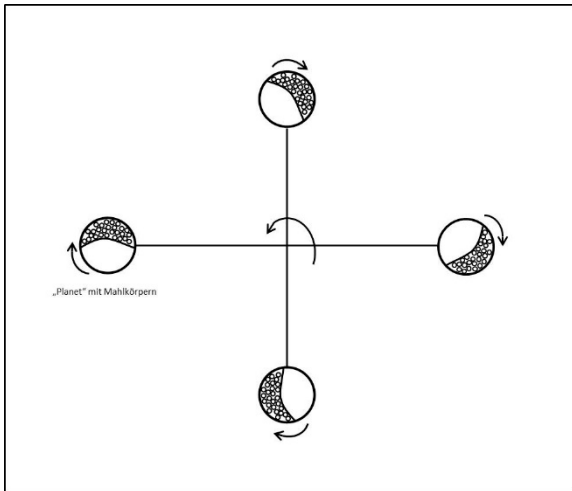
**Abbildung 23** genutzte Planetenkugelmühle am IFAD (Quelle ECG)

Planetenkugelmühlen besitzen ebenfalls zylindrische Mahlräume und sind mit Mahlkörpern von unterschiedlichen Durchmessern (Kugeln) gefüllt (Abbildung 24).



**Abbildung 24** „Planet“ – Mahraum mit Mahlkörperfüllung (Quelle ECG)

Der höhere Energieeintrag erfolgt durch eine rotierende Bewegung um ein Zentrum und einer zusätzlich gegenläufig rotierenden Bewegung der „Planeten“. Die Funktionsweise ist in Abbildung 25 dargestellt.



**Abbildung 25 Funktionsprinzip der Planetenkugelmühle (Quelle ECG)**

Versuchsauswertung:

- Maschinenlaufzeit  $t_1 = 1$  min: kaum bis gar kein Aufschluss (Abbildung 26)
- Maschinenlaufzeit  $t_1 = 5$  min: beginnender Aufschluss (Abbildung 27)
- Maschinenlaufzeit  $t_2 = 10$  min: deutliche Abnahme der Schichten (Abbildung 28)
- Maschinenlaufzeit  $t_3 = 15$  min: Chips nahezu vollständig ab gemahlen (Abbildung 29)



**Abbildung 26: Aufschluss nach  $t_1$  (Quelle ECG)**



**Abbildung 27: Aufschluss nach  $t_2$  (Quelle ECG)**



**Abbildung 28 Aufschluss nach  $t_3$  (Quelle ECG)**



**Abbildung 29: Aufschluss nach  $t_4$  (Quelle ECG)**

Fazit: Es ist im Rahmen des Projekts gelungen, mittels mechanischer Zerlegung die Hochleistungsplatinen mit Gallium- haltigen Chips zu separieren und als eine eindeutige Zwischenfraktion anzureichern. Durch die weitere mechanische Aufbereitung im Mahlkörperverfahren wurden die Chips von der Kupfer- haltigen Trägerplatte entfernt. Das dabei entstandene Mahlgut kann hydrometallurgisch aufbereitet werden, um ggf. enthaltenes Gallium zurück zu gewinnen.

#### **5.2.4. Weitere Verwertung der erzeugten Wertstofffraktionen**

Die Fraktion Aluminium mit Anhaftungen wird mit einem weiteren Aufbereitungsschritt gereinigt und von Anhaftungen und Fremdbestandteilen befreit. Das gereinigte Aluminium erreicht Qualitäten für einen direkten Wiedereinsatz in Aluminiumschmelzwerken. Die Leiterplattenfraktion und Prozessoren werden in Sekundärkupferhütten eingesetzt, in denen die enthaltenen Metalle wie Kupfer, Gold, Silber, Palladium und Zinn zurück gewonnen werden. Die heizwertreichen Bestandteile der Leiterplatte werden hierbei energetisch verwertet und ersetzen andere Energieträger im Verhüttungsprozess. Alle weiteren metallischen Fraktionen, wie kupferhaltige Bestandteile aus Kabeln, Eisenbestandteile usw. werden mechanisch weiter aufbereitet, sortiert und gelangen möglichst sortenrein in die geeigneten Folgebehandlungsprozesse.

### **5.3. Entwicklung einer zusätzlichen Aufbereitungsstufe mittels chemischer Platinentstückung**

#### **Bearbeitung durch IFAD**

##### **5.3.1. Chemische Platinentstückung im Säurebad (IFAD)**

Durch die vom Projektpartner Electroycling entwickelte Aufschlusszerkleinerung mittels Prallmühle können die Platinen der LE-Einheiten weitestgehend intakt separiert werden und direkt an Sekundärkupferhütten verkauft werden, allerdings gehen hierbei einige Sondermetalle wie beispielsweise Tantal verloren (vgl. Kap. 4.2.2). Im Rahmen des Projektes ElmoReL2020 wurde untersucht, inwieweit eine Ablösung der Bauteile durch die chemische Auflösung der Lötverbindungen möglich und sinnvoll ist, um eine weitergehende Aufbereitung der Platinen zu ermöglichen mit dem Ziel, Sondermetallkonzentrate zu erzeugen. Des Weiteren sollte die Möglichkeit geprüft werden, die Zinnausbeute gegenüber den pyrometallurgischen Recyclingprozessen zu erhöhen.

Hierzu wurden als erstes Vorversuche durchgeführt, um die Wirkung von verschiedenen Säuren (Schwefelsäure, Salzsäure, Salpetersäure) und Natronlauge teilweise in Kombination mit Wasserstoffperoxid auf die Platinen zu untersuchen. In den Vorversuchen zeigte sich, dass nur Salpetersäure und Salzsäure in Kombination mit Wasserstoffperoxid in der Lage sind, die Bauteile innerhalb akzeptabler Zeiten nahezu vollständig abzulösen.

Bei der Behandlung mit Salpetersäure war auffällig, dass zum einen nitrose Gase freigesetzt wurden und dass zum anderen das gelöste Zinn direkt wieder als weißer, gelartiger Niederschlag ausfällt, der nur schwierig zu filtrieren ist. Bei der Behandlung mit Salzsäure in Kombination mit Wasserstoffperoxid trat der Niederschlag nicht auf. Neben Zinn wurde bei beiden Ansätzen vor allem Kupfer mitgelöst. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde entschieden, nur die Behandlung mit Salzsäure in Kombination mit Wasserstoffperoxid weiter zu untersuchen und zu optimieren.

In den Untersuchungen zeigte sich, dass sich die Platinen am schnellsten bei erhöhten Temperaturen (60 °C), stark sauren Bedingungen (pH 0) und hohen Redoxpotentialen (> 600 mV



(Ag/AgCl)) entstückten lassen. Die notwendige Behandlungsdauer betrug in Abhängigkeit der Bestückung bis zu 140 Minuten. Dies lag daran, dass sich die großen Tantalkondensatoren erst spät lösten. Kleinere bis mittelgroße Bauteile dagegen lösten sich bereits nach 60 bis 120 Minuten. Eine Priorisierung auf bestimmte Bauteile hat daher große Auswirkungen auf die Behandlungsdauer und somit auch auf die Verbräuche. Diese lagen für Salzsäure (37 %) bei 350 bis 400 ml/kg(Platinen) und für Wasserstoffperoxid (30 %) bei 250 bis 500 ml/kg(Platinen). Die sehr hohen Chemikalienverbräuche sind vor allem auf die ungewollte teilweise Auflösung aluminium- (vor allem Kondensatoren) und eisenhaltiger Bauteile zurückzuführen. Die Behandlungslösung konnte für mehr als 10 Durchgänge wiederverwendet werden, ohne dass dies eine negative Wirkung auf die Behandlungsdauer hatte, allerdings stiegen die Chemikalienverbräuche stark an.

Neben Kupfer und Zinn konzentrierten sich vor allem Eisen, Aluminium, Zink und Nickel in der Lösung auf. Zudem wurde ein Ausfällen von Bleichlorid beobachtet. Kupfer kann durch Zementation mit Eisen selektiv zurückgewonnen werden. Weitere Metalle wie Zinn, Blei und Nickel lassen sich durch fraktionierte Sulfidfällungen bei unterschiedlichen pH-Werten aus der Lösung gewinnen.

Die entstückten Platinen können an Kupferhütten verkauft werden, während sich aus der abgelösten Bauteilfraktion mittels sensorgestützter Sortierung und/oder Verfahren der mechanischen Aufbereitung je nach Zusammensetzung verschiedene Metallkonzentrate erzeugen lassen. Marktfähige Tantalkonzentrate lassen sich beispielsweise mit dem von [Römer 2016] beschriebenen Verfahren erzeugen. Durch eine sortierende Klassierung bei ca. 2 mm lässt sich in vielen Fällen eine palladiumreiche Fraktion mit Palladiumgehalten um 1000 ppm erzeugen.

## 5.4. Ökobilanzielle Betrachtung

### **Bearbeitung: Öko-Institut mit Input für die Sachbilanz von allen Partnern**

Zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen der verschiedenen Verwertungsrouten und möglicher Optimierungspotentiale wurde für jeden der drei Behandlungswege (Autoshredder, Elektrorecyclingroute, Elektrorecyclingroute inklusive chemischer Platinenentstückung) eine Ökobilanz erstellt. Darauf aufbauend wurde das ökologische Potential der Elektrorecyclingroute für ein Aufkommen von 1 Mio. Leistungselektronikmodulen jährlich abgeschätzt.

Der ausführliche Ökobilanzbericht befindet sich im Anhang.

#### **5.4.1. Methodik und Systemgrenzen**

Die Ökobilanzen wurden nach ISO 14040/44 [DIN 14040 2009] [DIN 14044 2006] mit der Bilanzierungssoftware GaBi 6.0 [Thinkstep 2015] auf Basis von Ecoinvent 3.1 [Ecoinvent 2014] durchgeführt. Als Wirkungsabschätzungsmethode wurde CML [CML 2015] in seiner Fassung von 2015 verwendet. Zur Untersuchung wurden die Wirkungskategorien Klimaerwärmungspotential (GWP), Eutrophierungspotential (EP), Versauerungspotential (AP), Photoxidantienbildungspotential (POCP), abiotischer Ressourcenverbrauch fossilen Typs (ADPfossil) und abiotischer Ressourcenverbrauch mineralischen Typs (ADPelementar) herangezogen. Die betrachtete funktionelle Einheit ist die Verwertung von 1 t Leistungselektronik, welche ohne Lasten in das Recycling geht.

In den Abbildungen 30 bis 32 sind die Systemgrenzen der drei betrachteten Routen dargestellt.

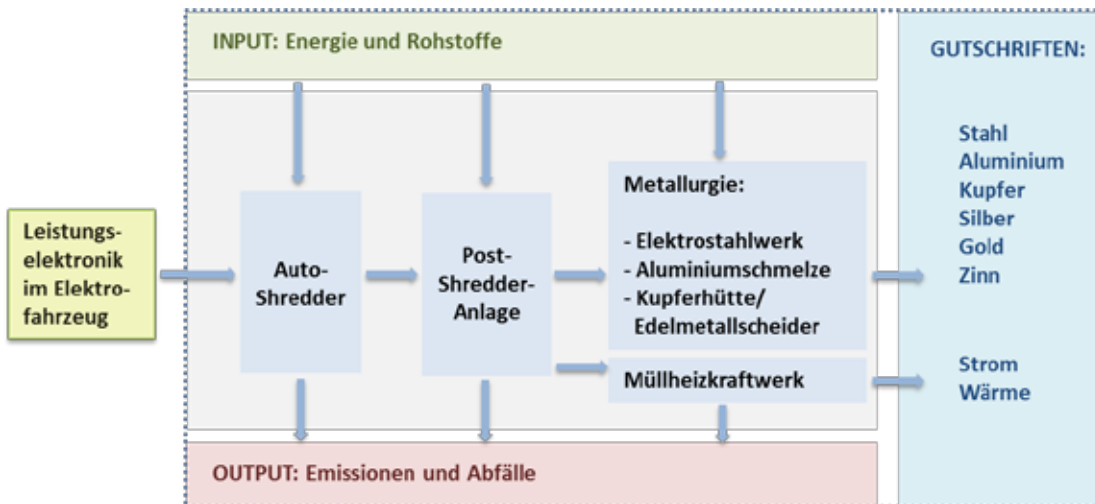


Abbildung 30 Systemgrenzen der Autoshredderroute

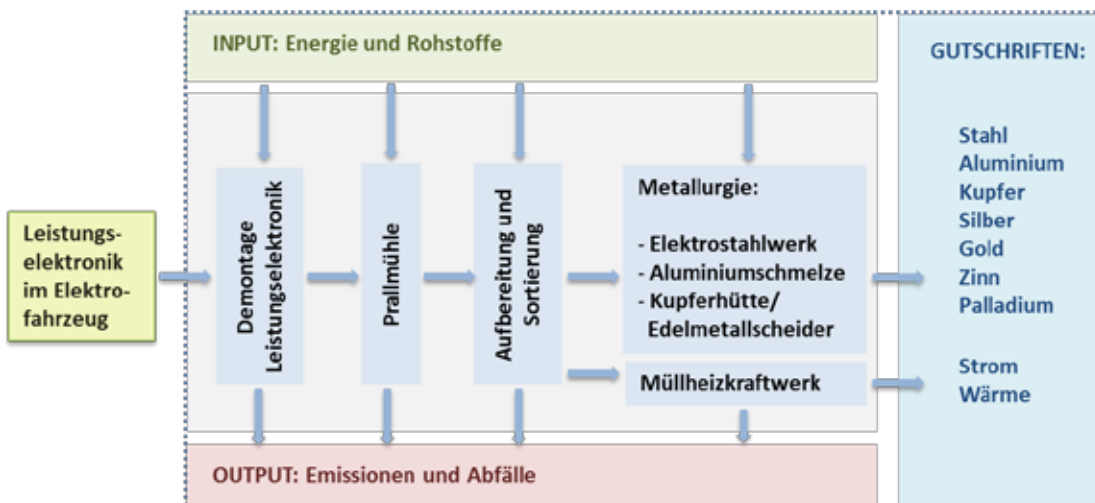


Abbildung 31 Systemgrenzen der Elektrorecyclingroute



Abbildung 32 Systemgrenzen der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinenentstückung

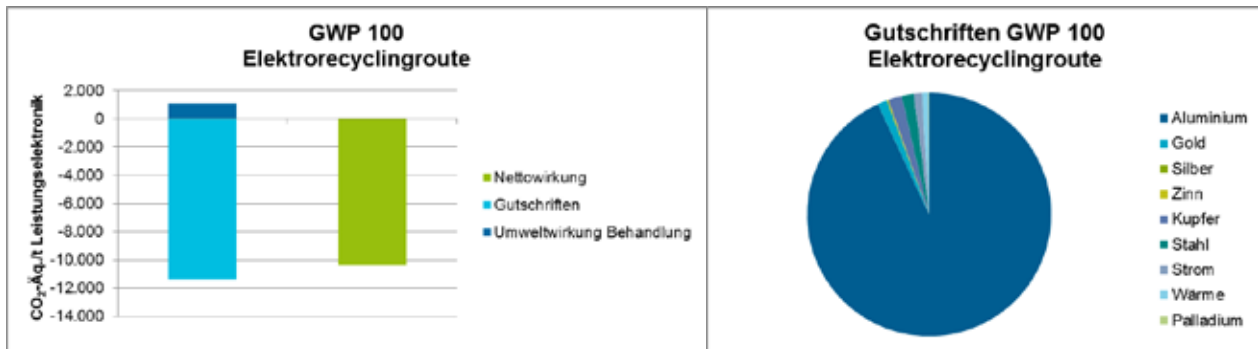
#### 5.4.2. Rückgewinnungsquoten

Von entscheidender Bedeutung für das Forschungsvorhaben und die Bewertung der zu entwickelnden Verfahren sind die ökologischen Potentiale der Elektrorecyclingroute im Vergleich zur Autosredderroute. Bei den Massenmetallen Eisen und Aluminium erreichen beide Routen sehr hohe Rückgewinnungsquoten, so dass hier kein Zusatznutzen zu erzielen ist. Das ökologische Potential der Elektrorecyclingroute liegt vielmehr bei höheren Rückgewinnungsquoten für die Edelmetalle und Zinn. Für diese Metalle wurde abgeschätzt, dass im Auto- und Post-Shredder rund 20 – 25 % wiedergewonnen werden, während es bei der Aufbereitung beim Elektroaltgerätrecycler rund 98 % sind. Diese Abschätzung beruht darauf, dass bei der Autosredderroute ein Großteil der Edelmetalle über fein verteilte Staubasträge für die Rückgewinnung verloren geht. In der Elektrorecyclingroute gelingt es, mit der Prallmühle die Staubfraktionen deutlich zu reduzieren und die Leiterplatten zu einem sehr hohen Anteil in die Fraktion zu überführen, die einer Kupfer- und Edelmetallverhüttung zugeführt wird. Dennoch ist anzumerken, dass die abgeschätzten Rückgewinnungsquoten mangels belastbarer Daten aus Versuchen bzw. der wissenschaftlichen Literatur Expertenabschätzungen darstellen, die für die orientierende Berechnungen in der Ökobilanz getroffen wurden und eine entsprechende hohe Unsicherheit aufweisen.

Für die zusätzliche chemische Platinentstückung wurde abgeschätzt, dass in der mechanischen und chemischen Aufbereitung rund 90 % des Tantals und 93 % des Zinns rückgewonnen werden. Das Zinn fällt hierbei jedoch im Gegensatz zu den anderen Metallen nicht metallisch, sondern in sulfidischer Form an.

#### 5.4.3. Ergebnisse

Sowohl für die Autosredderroute als auch für die Elektrorecyclingroute ergeben sich hohe Nettogutschriften für alle Wirkungskategorien (GWP,  $ADP_{\text{fossil}}$ , AP,  $ADP_{\text{elementar}}$ , EP und POCP). Dieses positive Ergebnis wird im Wesentlichen durch eine optimierte mechanische Aufbereitung ermöglicht, die zu sehr hohen Rückgewinnungsquoten bei den Massenmetallen Aluminium, Eisen und Kupfer führt. In der Ökobilanz dominieren hier insbesondere die Gutschriften aus der Aluminiumverwertung. Bei der Elektrorecyclingroute werden zusätzlich auch die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium mit hohen Verwertungsquoten wiedergewonnen. Ökobilanziell schlägt sich das in der Bilanz für die gesamte Leistungselektronik nur für Gold in den Wirkungskategorien ‚elementarer Ressourcenverbrauch‘ und ‚Eutrophierungspotenzial‘ nieder. Für einen relevanten Anteil in anderen Wirkungskategorien ist der Massenanteil der Edelmetalle an der gesamten Leistungselektronik inkl. Gehäuse zu gering. Beispielhaft sind in den folgenden zwei Grafiken (Abbildung 8) die Ergebnisse für die Elektrorecyclingroute für das Klimaerwärmungspotenzial dargestellt. Für den interessierten Leser sind die Detailergebnisse im Anhang im separaten Ökobilanz-Bericht enthalten.



**Abbildung 33 Ergebnisse für die Wirkungskategorie Klimaerwärmungspotential für die Elektrorecyclingroute, bezogen auf 1 t Leistungselektronik**

Die Ergebnisse für die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinenentstückung sind weitgehend identisch mit den Ergebnissen der Elektrorecyclingroute, da sich die Sachbilanz im Wesentlichen nur durch den zusätzlichen Aufwand der chemischen Platinenentstückung und die zusätzliche Gutschrift aus der Tantalverwertung unterscheidet. Da die Tantal mengen in der Leistungselektronik sehr klein sind, schlagen sich die Tantal gutschriften nicht nennenswert in der Bilanz nieder. Gleiches gilt für die eingesetzten Chemikalien für die chemische Platinenentstückung, die im Vergleich zum energieintensiven Aluminiumrecycling nur eine untergeordnete Relevanz haben. Auch wenn die Daten für die chemische Platinenentstückung aus Laborversuchen hergeleitet wurden und eine entsprechende Datenunsicherheit besteht, kann aus der Ökobilanz bereits abgeleitet werden, dass von einer chemischen Platinenentstückung keine relevanten ökologischen Vorteile zu erwarten sind. Denn den Vorteilen einer zusätzlichen Tantalrückgewinnung stehen entsprechende Aufwendungen für die eingesetzten Lösemittel gegenüber.

## 5.5. Ressourceneinsparungspotentiale

### Bearbeitung durch alle Partner

Es wurde weiterhin abgeschätzt, welche zusätzliche Ressourceneinsparung bei breiter Anwendung der Elektrorecyclingroute erzielt werden könnte. Pro Tonne Leistungselektronik wird abgeschätzt, dass die Elektrorecyclingroute im Vergleich zur Autosredderroute ein Mehrrecycling von 6,7 g Gold, 23,5 g Silber, 1,3 g Palladium und 527 g Zinn ermöglicht. Die chemische Leiterplattenentstückung führt darüber hinaus noch zu einem zusätzlichen Recycling von 320 g Zinn und 10,4 g Tantal. Bei einem künftigen jährlichen Absatz von 1 Millionen Elektrofahrzeuge und einem um die Nutzungsdauer zeitversetzten Anfall zur Verwertung könnten mit der Elektrorecyclingroute ohne chemische Platinenentstückung im Vergleich zur Autosredderroute schätzungsweise folgende Metallmengen mehr wiedergewonnen werden: 7 t Zinn, 85 kg Gold, 300 kg Silber, 17 kg Palladium und 70 t Kupfer. Bei der Interpretation der Zahlen ist jedoch zu beachten, dass für die Rückgewinnungsquoten der Edelmetalle keine gesicherten Daten vorliegen und es aus methodischen Gründen voraussichtlich auch zukünftig nicht möglich sein wird, exakte Daten zu ermitteln. Deshalb handelt es sich hier um eine orientierende Abschätzung. Dennoch zeigen diese Zahlen sehr deutlich, dass bei einem künftigen Durchbruch der E-Mobilität mit einer jährlichen Neuzulassung von mehreren Millionen Fahrzeugen ein optimiertes Recycling zu einer relevanten Ressourceneinsparung führen kann. So stehen beispielsweise einer zusätzlichen Rückgewinnung von 85 kg Gold aus 1 Mio. Leistungselektronik-Modulen ein derzeitiger Verbrauch von 12.000 kg im gesamten Elektrik- und Elektronikbereich in Deutschland gegenüber [11].

## 5.6. Ökonomische Betrachtung (Öko-Institut und Partner)

### Bearbeitung durch alle Partner

In den Tabellen 5 bis 7 sind die Kosten, Erlöse sowie die Bilanzsumme daraus für die einzelnen Behandlungsrouten, gerundet auf Euro, dargestellt. Die Zahlen zu den einzelnen Kostenblöcken stammen aus offiziellen Lieferantenpreislisten, Projektergebnissen und Abschätzungen aus Praxiserfahrungen. Die Preise beziehen sich auf die aktuelle Situation aus dem Jahr 2016 und können sich vor allem für die Erlöse mit der Veränderung der Metallpreise deutlich ändern.

**Tabelle 5**            **Ökonomische Bilanzierung der Autoshredderroute, bezogen auf 1 t Leistungselektronik**

Verwertungskosten		Erlöse	
Autoshredder incl. Aufbereitung und Postshredder	200 €	Erlöse durch Verkauf der Fraktionen aus Autoshredderroute	<b>887 €</b>
Transport Autoshredder -> Postshredder und Postshredder -> Endverwerter	24 €		
<b>Gesamtkosten</b>	<b>224 €</b>	<b>Gesamterlöse</b>	<b>887 €</b>
<b>Bilanzsumme</b>	<b>663 €</b>		

**Tabelle 6**            **Ökonomische Bilanzierung der Elektrorecyclingroute, bezogen auf 1 t Leistungs-elektronik**

Verwertungskosten		Erlöse	
Demontage	591 €	Erlöse durch Verkauf der Fraktionen aus Elektrorecyclingroute	1006 €
Transport Demontage -> Elektrorecycler und Elektrorecycler -> Endverwerter	24 €		
Prallmühle incl. Aufbereitung	246 €		
<b>Gesamtkosten</b>	<b>861 €</b>	<b>Gesamterlöse</b>	<b>1006 €</b>
<b>Bilanzsumme</b>	<b>145 €</b>		

**Tabelle 7**            **Ökonomische Bilanzierung der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung, bezogen auf 1 t Leistungselektronik**

<b>Verwertungsschritt</b>		<b>Erlöse</b>	
Demontage	591 €	Erlöse durch Verkauf der Fraktionen aus Elektrorecyclingroute	1006 €
Transport Demontage -> Elektrorecycler und Elektrorecycler -> Endverwerter	24 €	Erlös Ta-Kondensatoren	2 €
Prallmühle incl. Aufbereitung	246 €	Erlös Zinnsulfid	10 €
Salzsäure, Wasserstoffperoxid, Natriumsulfit	10 €		
Investitions-, Personal- und Stromkosten für Platinentstückung	34 €		
Abwasserentsorgung	19 €		
Sortierung Ta-Kondensatoren	2 €		
<b>Gesamtkosten</b>	<b>926 €</b>	<b>Gesamterlöse</b>	<b>1018 €</b>
<b>Bilanzsumme</b>	<b>92 €</b>		

Die Autosshredderroute ist das mit Abstand günstigste Verfahren, da hier keine Demontage erforderlich ist und die Behandlungskosten aufgrund des hohen Durchsatzes niedrig sind. Die hohen Demontagekosten führen bei der Elektrorecyclingroute zu deutlich höheren Kosten. In Summe erzielt sie aber dennoch ein positives Ergebnis und ist somit bei den gewählten Annahmen wirtschaftlich darstellbar. Der Zusatz der chemischen Platinentstückung ist bei den aktuellen Erlösen für die Metalle nicht wirtschaftlich und würde zu einem Verlust führen. Grund hierfür sind die hohen Kosten für die entsprechenden Anlagen und den Betrieb, die nicht annähernd durch die vermehrten Metallerlöse ausgeglichen werden.

## 6. Darstellung wesentlicher Abweichungen zum Arbeitsplan

Im **Arbeitspaket 2 Task 2 (Entnahme und Zerlegung, Aufbau von Zerlegeplätzen)** wurde von einem Aufbau spezieller/geeigneter Zerlegeplätze abgesehen. Nach den zur Analyse nötigen Zerlegeversuchen war klar, dass der Personaleinsatz bei einer manuellen Zerlegung zu hoch ist, um diese Leistungselektronikkomponenten wirtschaftlich zu verarbeiten. Electrorecycling verfügt über Aggregate, welche in anderer Applikation die Zerlegung und Schadstoffentfrachtung unterstützen und den Personalaufwand so gering wie möglich halten. Die Aggregate wurden auch für die Zerlegung der LE-Komponenten verwendet. Sehr rasch stellten sich hier positive Ergebnisse im Aufschluss der LE-Komponenten ein. Prinzipiell vermischen sich hier die Aufgaben und Ziele aus den Arbeitspaketen 2 und 3. Diese Herangehensweise war in der Projektantragsphase nicht absehbar aber letztlich erfolgreich.

Im **Arbeitspaket 3 Task 1 (Mechanische Aufbereitung, Versuchsreihen mit mechanischen Zerkleinerungsverfahren)** sind für die mechanische Aufbereitung der LE-Komponenten einige im Antrag geplante Herangehensweisen nicht untersucht worden. So haben folgende geplante Untersuchungen nicht stattgefunden:

- Zerkleinerung in Hammermühle nach thermischer Vorbehandlung

Nach den Erkenntnissen aus den Zerlegeversuchen wurde keine Notwendigkeit gesehen, die LE-Komponenten vor einer Zerkleinerung in einer Hammermühle thermisch zu behandeln. Im Aufbau der LE-Komponenten waren keine Verbindungen, die man durch ein Erwärmen vor der eigentlichen Zerkleinerung gezielt hätte auflösen können.

- Zerkleinerung in einer Prallmühle nach kryogener Vorbehandlung

Auch eine Kryogen- Vorbehandlung war auf Grundlage der Zerlege-Analysen nicht nötig. Es wurden keine Verbundmaterialien gefunden, welche nicht durch alleinige mechanische Beanspruchung aufzuschließen sind.

- Zerkleinerung durch Einsatz gepulster Hochspannungsversuche

Die bei Anwendern solcher Technologien zur Verfügung stehenden Aggregate waren zum einen nicht ausreichend groß (Größe des Reaktorraumes). Zum anderen war nach Zerlege-Analysen und den erfolgreich durchgeführten Prallmühlenversuche klar, dass eine Untersuchung solcher recht teuren Anwendungen nicht nötig ist. Alle gefunden Verbindungen und Verbundstoffe sind mit herkömmlichen mechanischen Aufbereitungstechniken lösbar.

Im **Arbeitspaket 3 Task 2 (Mechanische Aufbereitung, Versuchsreihen mit Sortierverfahren)** haben folgende Versuche entgegen der Projektplanung nicht stattgefunden:

- Feinkorndichtentrennung auf einem Feinkornnassherd und einem Zentrifugalfeld-Dichtescheider
- Feinkornmagnetscheidung
- Elektrostatikscheidung
- Feinkornwirbelstromscheidung
- Flotation

Aus den mechanischen Aufbereitungsversuchen der Zielplatinen (Hochleistungsplatine mit Chips) wurde ein Pulver erzeugt, welches sich im Feinstkorn-Bereich befand (< 0,1 mm). Die geplanten Anwendungen waren für die erzeugten Pulver nach einer mechanischen Aufbereitung der

Zielplatinen nicht mehr zielführend. Das erzeugte Pulver war nicht geeignet, mittels Flotation eine weitere Anreicherung zu erzeugen. Das Pulver verhielt sich hydrophob und war in der Gesamtmenge auch zu gering für eine Flotation.

Das **Arbeitspaket 4 (Hydrometallurgische Vorkonzentration)** ist auf Grund der Änderung der ursprünglichen Zielsetzung (Recycling Gallium und ggf. weiteren Halbleitermetallen) weitgehend entfallen. Stattdessen wurden im Rahmen des Projektes die Untersuchungen zur chemischen Leiterplattenentstückung durchgeführt, die nicht im ursprünglichen Arbeitsplan enthalten sind.

Das **Arbeitspaket 5 (Metallurgische Verwertung und Raffination)** ist vollständig entfallen. Das ursprüngliche Ziel war die hydrometallurgische Aufkonzentration von Gallium, Indium und Germanium. Die Analysen haben gezeigt, dass keines dieser Elemente in nennenswerten Mengen in der heutigen Leistungselektronik enthalten ist. Da zu erwarten ist, dass zukünftig Gallium in einigen Leistungschips enthalten sein wird, wurden im vorangegangenen Arbeitspaket 1 die spezifischen Galliummengen pro Leistungselektronikmodul abgeschätzt (vgl. Kap. 4.1.1), und es wurden in AP 3 Versuche gemacht, wie die Chips, die perspektivisch Gallium enthalten können, für eine nachfolgende Aufkonzentration separiert werden können (vgl. Kap. 5.2.3).

## 7. Zusammenarbeit mit anderen Stellen und Fortschritte von anderen Seiten

Eine über die gesamte Projektlaufzeit kontinuierliche Zusammenarbeit mit Dritten war nicht geplant und hat sich im Projektverlauf auch als nicht notwendig erwiesen. Durch die im Projektvorhaben vertraglich eingebundenen Partner und Gespräche mit externen Experten, war die notwendigen Kompetenz zur erfolgreichen Durchführung des Projekts vorhanden bzw. konnte erarbeitet werden.

## 8. Wissenschaftlicher Nutzen, Verwertung und Veröffentlichungen

Der wissenschaftliche Nutzen und die Verwertung des Projektergebnisses sind durch die Entwicklung einer praxistauglichen, ökonomisch tragfähigen und ökologisch vorteilhaften Recyclingroute für die Leistungselektronik gegeben. Auf diese Recyclingroute kann zurückgegriffen werden, sobald Elektrofahrzeuge zur Verwertung anfallen. Hervorzuheben ist hierbei, dass die Recyclingroute auf standardisierte Aufbereitungstechnik aufbaut, so dass sich für die Recyclingfirmen keine Hindernisse durch große Investitionsanforderungen stellen. Solange die Menge der zur Verwertung anfallenden Elektrofahrzeuge sehr gering ist, kann der zusätzliche Logistikaufwand dennoch ein Hindernis bei der Umsetzung der Recyclingroute sein.

Die Ergebnisse der Versuche zur chemischen Platinenentstückung führen zu der Schlussfolgerung, dass eine Säurebehandlung kein geeigneter Pfad zur weiteren Aufbereitung von Platinen ist. Dieses Fazit gilt nicht nur für die Leistungselektronik, sondern auch für Platinen aus anderen Elektronikanwendungen. Weitere Forschungsarbeiten zur chemischen Platinenentstückung sind deshalb nicht zu empfehlen.

Folgende Veröffentlichungen wurden gemacht:

- T. Elwert; D. Goldmann; F. Römer; M. Buchert; C. Merz, D. Schueler, J. Sutter: Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (Hybrid) Electric Vehicles. Recycling 2016, 1, 25-60. T. Elwert; D. Goldmann; F. Römer; M. Buchert; D. Schüler: Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen beim Recycling von Elektro- und Hybridfahrzeugen in: K. J. Thomé-Kozmiensky; D. Goldmann: Recycling und Rohstoffe, Band 9 (Tagungsband der Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz 2016).



- T. Elwert; D. Goldmann; F. Römer; M. Buchert; D. Schüler: Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen beim Recycling von Elektro- und Hybridfahrzeugen, Vortrag auf dem „Tag der Metallurgie 2016“ am 04. März in Goslar.
- W. Bulach; D. Schüler; G. Sellin; T. Elwert; D. Schmid; D. Goldmann; M. Buchert; U. Kammer: Elektrofahrzeugrecycling 2020 – Schlüsselkomponente Leistungselektronik in: K. J. Thomé-Kozmiensky; D. Goldmann: Recycling und Rohstoffe, Band 10 (Tagungsband der Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz 2017).
- Eine englisch-sprachige Veröffentlichung ist in Vorbereitung.

## Literaturverzeichnis

- [Bauer 2015] Bauer, W.; Rothfuss, F.; Dungs, J.; Herrmann, F.; Cacilo, A.; Schmidt, S.; Brand, M.; Klausmann, F.; Borrmann, D.: Strukturstudie BW<sup>e</sup> mobil 2015: Elektromobilität in Baden-Württemberg, Stuttgart, [http://www.e-mobilbw.de/de/service/publikationen.html?file=files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/14524\\_Strukturstudie\\_RZ\\_WebPDF.pdf](http://www.e-mobilbw.de/de/service/publikationen.html?file=files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/14524_Strukturstudie_RZ_WebPDF.pdf).
- [BMUB 2016] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Klimaschutzplan 2050, Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, 14.11.2016, [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf).
- [Buchert 2011a] Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C.; Schüler, D.: Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBRI. Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren. Öko-Institut, Darmstadt, 2011.
- [Buchert 2011b] Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C., Schüler, D.: Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec I). Öko-Institut, Darmstadt, 2011.
- [Buchert 2015a] Buchert, M.; Sutter, W.: Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien. Öko-Institut, Darmstadt, 2015.
- [Buchert 2015b] Buchert, M.; Sutter, W.: Ökobilanzen zum Recyclingverfahren EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien. Öko-Institut, Darmstadt, 2015.
- [CML 2015] CML Leiden: Database CML-IA v4.4, Institute of Environmental Sciences, Leiden University, Leiden; <http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>, January 2015.
- [Deinhardt 2017] Deinhardt, Christina: Siliziumcarbid-MOSFET für Elektroautos, elektroniknet.de, 11.1.2017, <http://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/elektromobilitaet/siliziumcarbid-mosfet-fuer-elektroautos-137467.html>
- [DIN 14044 2006] DIN EN ISO 14044:2006-10 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006-10). Berlin 2006.
- [DIN 14040 2009] DIN EN ISO 14040:2009-11 Umweltmanagement - Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2009-11). Berlin 2009.
- [Ecoinvent 2014] ecoinvent: Ökobilanz-Datenbank ecoinvent v3.1; <http://www.ecoinvent.org>; integriert in GaBi v6.0, Zürich 2014.
- [Fraunhofer IISB 2013] Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie: Günstigere Elektrofahrzeuge durch motorintegrierte Leistungselektronik: Start für Projekt EMiLE, Erlangen 2013.
- [Grasshoff 2011] Grasshoff, T.: elektronik Journal 2011, Mai 2011, S. 12-16.

- [Kammer 2012] Kammer, Ulrich, PPM Pure Metals GmbH: Recycling von Gallium, Germanium und Indium. Vortrag zum Deutschen Rohstoffeffizienz-Preis 2012, 29.11.2012
- [Kohlmeyer 2015] Kohlmeyer, R.; Groke, M.; Sander, K.; Bergamos, M.: Perspektiven der zunehmenden Fahrzeugelektronik für das Altfahrzeugrecycling. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D.: Recycling und Rohstoffe – Band 8. Neuruppin 2015.
- [Kreibe 2016] Kreibe, S.; Förster, A.: Strategische Metalle aus Telekommunikations-Netztechnik: Endlich eine Chance für Robotik?, Recy & DepoTech 2016, Leoben, 08. – 11.11.2016. In: Tagungsband zur 13. Recy & DepoTech-Konferenz, Hrsg.: Pomberger, R. et al., Abfallverwertungstechnik & Abfallwirtschaft Eigenverlag, S. 183-188.
- [Römer 2016] Römer, F.; Elwert, T.; Goldmann, D.: Challenges and a possible solution for the recycling of tantalum from waste electrical and electronic equipment. Published in: Proceedings of the XXVIII International Mineral Processing Congress (IMPC 2016), Paper ID 157, ISBN: 978-1-926872-29-2, September 11-15, 2016, Québec City, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.
- [Schüler 2015] Schüler, D.: Mündliche Experteneinschätzungen von Herstellern auf der PCIM Europe in Nürnberg, 2015.
- [semiconductor 2016] semiconductor today: GaN Systems' transistors used in winning inverter design for \$1m Google Little Box Challenge, 7.3.2016, [http://www.semiconductor-today.com/news\\_items/2016/mar/gansystems\\_070316.shtml](http://www.semiconductor-today.com/news_items/2016/mar/gansystems_070316.shtml)
- [Siemens 2014] Siemens AG; Daimler AG; Öko-Institut e. V.; Umicore AG & Co. KG; Vacuumschmelze GmbH; Universität Erlangen-Tübingen; TU Clausthal; Fraunhofer Gesellschaft, Institut für System- und Innovationsforschung (ISI): Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrantrieben – Motor Recycling (MORE). Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über Forschungszentrum Jülich, 2014.
- [Thinkstep 2015] thinkstep AG: Ökobilanzierungssoftware GaBi v6. Leinfelden-Echterdingen 2015.
- [Van Shaik 2014] Van Schaik, A.; Reuter, M. A.: Material-Centric (Aluminum and Copper) and Product-Centric (Cars, WEEE, TV, Lamps, Batteries, Catalysts) Recycling and DfR Rules. In: Handbook of Recycling: State-of-the-Art for Practitioners, Analysts, and Scientists; Worrell, E., Reuter, M., Eds.; Elsevier: Waltham, UK, 2014; S. 307–378.
- [Widmer 2015] 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., 2015, 49 (7), S. 4591–4599.

## Anhang: Ökobilanzbericht

# Ökobilanzen zum Projekt Elektrofahrzeugrecycling 2020 - Schlüsselkomponente Leistungselektronik

Darmstadt, 07.02.2017

## **Autoren**

Dr. Winfried Bulach  
Stefanie Degreif  
Dr. Doris Schüler  
Dr. Matthias Buchert

## **Geschäftsstelle Freiburg**

Postfach 17 71  
79017 Freiburg

### **Hausadresse**

Merzhauser Straße 173  
79100 Freiburg  
Telefon +49 761 45295-0

## **Büro Berlin**

Schicklerstraße 5-7  
10179 Berlin  
Telefon +49 30 405085-0

## **Büro Darmstadt**

Rheinstraße 95  
64295 Darmstadt  
Telefon +49 6151 8191-0

[info@oeko.de](mailto:info@oeko.de)  
[www.oeko.de](http://www.oeko.de)

**Endbericht,**  
gefördert durch das

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>1. Zusammenfassung</b>	<b>9</b>
<b>2. Hintergrund der Studie und Aufbau des Berichts</b>	<b>12</b>
<b>3. Ziele und Untersuchungsrahmen</b>	<b>13</b>
<b>3.1. Ziele und Anwendungen der Studie</b>	<b>13</b>
<b>3.2. Festlegung des Untersuchungsrahmens</b>	<b>14</b>
3.2.1. Funktion und funktionelle Einheit	14
3.2.2. Festlegung der Systemgrenzen	15
3.2.3. Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität	18
3.2.4. Allokation	19
3.2.5. End-of-Life Allokation	20
3.2.6. Berücksichtigte Wirkungskategorien	21
3.2.7. Methoden der Auswertung	24
3.2.8. Konformität und kritische Prüfung	25
3.2.9. Einschränkungen	25
3.2.10. Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts	25
<b>4. Sachbilanz</b>	<b>25</b>
<b>4.1. Prozessbeschreibung</b>	<b>25</b>
<b>4.2. Datengrundlage</b>	<b>28</b>
4.2.1. Spezifische Daten	28
4.2.2. Generische Datensätze	33
4.2.3. Modellierung der Transporte	34
4.2.4. Modellierung der Gutschriften	34
<b>4.3. Einschätzung der Datenqualität</b>	<b>37</b>
<b>5. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung</b>	<b>37</b>
<b>5.1. Route 1: Autoshredderroute</b>	<b>38</b>
5.1.1. Klimaerwärmungspotenzial (GWP)	38
5.1.2. Versauerungspotenzial (AP)	41

5.1.3.	Eutrophierungspotenzial (EP)	44
5.1.4.	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)	47
5.1.5.	Elementarer Ressourcenverbrauch ( $ADP_{\text{elementar}}$ )	50
5.1.6.	Fossiler Ressourcenverbrauch ( $ADP_{\text{fossil}}$ )	53
<b>5.2.</b>	<b>Route 2a: Elektrorecyclingroute</b>	<b>56</b>
5.2.1.	Klimaerwärmungspotenzial (GWP)	56
5.2.2.	Versauerungspotenzial (AP)	59
5.2.3.	Eutrophierungspotenzial (EP)	62
5.2.4.	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)	65
5.2.5.	Elementarer Ressourcenverbrauch ( $ADP_{\text{elementar}}$ )	68
5.2.6.	Fossiler Ressourcenverbrauch ( $ADP_{\text{fossil}}$ )	71
<b>5.3.</b>	<b>Route 2b: Elektrorecyclingroute (ERR) mit chemischer Platinenentstückung</b>	<b>74</b>
5.3.1.	Klimaerwärmungspotenzial (GWP)	74
5.3.2.	Versauerungspotenzial (AP)	77
5.3.3.	Eutrophierungspotenzial (EP)	80
5.3.4.	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)	83
5.3.5.	Elementarer Ressourcenverbrauch ( $ADP_{\text{elementar}}$ )	86
5.3.6.	Fossiler Ressourcenverbrauch ( $ADP_{\text{fossil}}$ )	89
5.3.7.	Ökologische Bewertung der chemischen Platinenentückung	92
<b>6.</b>	<b>Auswertung</b>	<b>92</b>
<b>6.1.</b>	<b>Identifizierung der signifikanten Parameter</b>	<b>92</b>
<b>6.2.</b>	<b>Beurteilung</b>	<b>94</b>
6.2.1.	Vollständigkeitsprüfung	94
6.2.2.	Sensitivitätsprüfung	94
6.2.2.1.	Vergleich der Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch	95
6.2.2.2.	Erhöhung der Verluste in Aufbereitung und Verhüttung	97
6.2.2.3.	Sensitivität der Platinenzusammensetzung	103
6.2.2.4.	Sensitivität des Aluminiumgehalts	104
6.2.2.5.	Chemische Platinenentstückung	105
6.2.3.	Konsistenzprüfungen	106
<b>6.3.</b>	<b>Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen</b>	<b>107</b>
<b>7.</b>	<b>Literatur</b>	<b>110</b>



<b>Annex 1: Verwendete generische Datensätze</b>	<b>115</b>
<b>Annex 2: Externes kritisches Gutachten</b>	<b>118</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Systemgrenze der Autorecyclingroute, FU: Recycling von 1000 kg EoL-Leistungselektronik	16
Abbildung 3-2:	Systemgrenze der Elektrorecyclingroute, FU: Recycling von 1000 kg EoL-Leistungselektronik	17
Abbildung 3-3:	Systemgrenze der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinenentstückung, FU: Recycling von 1000 kg EoL-Leistungselektronik	18
Abbildung 5-1:	GWP: Gesamtwirkung Autoshredderroute	38
Abbildung 5-2:	GWP: Anteile der Prozesse der Autoshredderroute an den Gesamtaufwendungen	39
Abbildung 5-3:	GWP: Gutschriftenanteile für die Autoshredderroute	40
Abbildung 5-4:	AP: Gesamtwirkung Autoshredderroute	41
Abbildung 5-5:	AP: Anteile der Prozesse der Autoshredderroute an den Gesamtaufwendungen	42
Abbildung 5-6:	AP: Gutschriftenanteile für die Autoshredderroute	43
Abbildung 5-7:	EP: Gesamtwirkung Autoshredderroute	44
Abbildung 5-8:	EP: Anteile der Prozesse der Autoshredderroute an den Gesamtaufwendungen	45
Abbildung 5-9:	EP: Gutschriftenanteile für die Autoshredderroute	46
Abbildung 5-10:	POCP: Gesamtwirkung Autoshredderroute	47
Abbildung 5-11:	POCP: Anteile der Prozesse der Autoshredderroute an den Gesamtaufwendungen	48
Abbildung 5-12:	POCP: Gutschriftenanteile für die Autoshredderroute	49
Abbildung 5-13:	ADP <sub>elementar</sub> : Gesamtwirkung Autoshredderroute	50
Abbildung 5-14:	ADP <sub>elementar</sub> : Anteile der Prozesse der Autoshredderroute an den Gesamtaufwendungen	51
Abbildung 5-15:	ADP <sub>elementar</sub> : Gutschriftenanteile für die Autoshredderroute	52
Abbildung 5-16:	ADP <sub>fossil</sub> : Gesamtwirkung Autoshredderroute	53
Abbildung 5-17:	ADP <sub>fossil</sub> : Anteile der Prozesse der Autoshredderroute an den Gesamtaufwendungen	54
Abbildung 5-18:	ADP <sub>fossil</sub> : Gutschriftenanteile für die Autoshredderroute	55
Abbildung 5-19:	GWP: Gesamtwirkung Elektrorecyclingroute	56
Abbildung 5-20:	GWP: Anteile der Prozesse der Elektrorecyclingroute an den Gesamtaufwendungen	57
Abbildung 5-21:	GWP: Gutschriftenanteile für die Elektrorecyclingroute	58
Abbildung 5-22:	AP: Gesamtwirkung Elektrorecyclingroute	59

Abbildung 5-23:	AP: Anteile der Prozesse der Elektrorecyclingroute an den Gesamtaufwendungen	60
Abbildung 5-24:	AP: Gutschriftenanteile für die Elektrorecyclingroute	61
Abbildung 5-25:	EP: Gesamtwirkung Elektrorecyclingroute	62
Abbildung 5-26:	EP: Anteile der Prozesse der Elektrorecyclingroute an den Gesamtaufwendungen	63
Abbildung 5-27:	EP: Gutschriftenanteile für die Elektrorecyclingroute	64
Abbildung 5-28:	POCP: Gesamtwirkung Elektrorecyclingroute	65
Abbildung 5-29:	POCP: Anteile der Prozesse der Elektrorecyclingroute an den Gesamtaufwendungen	66
Abbildung 5-30:	POCP: Gutschriftenanteile für die Elektrorecyclingroute	67
Abbildung 5-31:	ADP <sub>elementar</sub> : Gesamtwirkung Elektrorecyclingroute	68
Abbildung 5-32:	ADP <sub>elementar</sub> : Anteile der Prozesse der Elektrorecyclingroute an den Gesamtaufwendungen	69
Abbildung 5-33:	ADP <sub>elementar</sub> : Gutschriftenanteile für die Elektrorecyclingroute	70
Abbildung 5-34:	ADP <sub>fossil</sub> : Gesamtwirkung Elektrorecyclingroute	71
Abbildung 5-35:	ADP <sub>fossil</sub> : Anteile der Prozesse der Elektrorecyclingroute an den Gesamtaufwendungen	72
Abbildung 5-36:	ADP <sub>fossil</sub> : Gutschriftenanteile für die Elektrorecyclingroute	73
Abbildung 5-37:	GWP: Gesamtwirkung ERR mit chemischer Platinentstückung	74
Abbildung 5-38:	GWP: Anteile der Prozesse der ERR mit chemischer Platinentstückung an den Gesamtaufwendungen	75
Abbildung 5-39:	GWP: Gutschriftenanteile für die ERR mit chemischer Platinentstückung	76
Abbildung 5-40:	AP: Gesamtwirkung ERR mit chemischer Platinentstückung	77
Abbildung 5-41:	AP: Anteile der Prozesse der ERR mit chemischer Platinentstückung an den Gesamtaufwendungen	78
Abbildung 5-42:	AP: Gutschriftenanteile für die ERR mit chemischer Platinentstückung	79
Abbildung 5-43:	EP: Gesamtwirkung ERR mit chemischer Platinentstückung	80
Abbildung 5-44:	EP: Anteile der Prozesse der ERR mit chemischer Platinentstückung an den Gesamtaufwendungen	81
Abbildung 5-45:	EP: Gutschriftenanteile für die ERR mit chemischer Platinentstückung	82
Abbildung 5-46:	POCP: Gesamtwirkung ERR mit chemischer Platinentstückung	83
Abbildung 5-47:	POCP: Anteile der Prozesse der ERR mit chemischer Platinentstückung an den Gesamtaufwendungen	84
Abbildung 5-48:	POCP: Gutschriftenanteile für die ERR mit chemischer Platinentstückung	85

Abbildung 5-49:	ADP <sub>elementar</sub> : Gesamtwirkung ERR mit chemischer Platinenentstückung	86
Abbildung 5-50:	ADP <sub>elementar</sub> : Anteile der Prozesse der ERR mit chemischer Platinenentstückung an den Gesamtaufwendungen	87
Abbildung 5-51:	ADP <sub>elementar</sub> : Gutschriftenanteile für die ERR mit chemischer Platinenentstückung	88
Abbildung 5-52:	ADP <sub>fossil</sub> : Gesamtwirkung ERR mit chemischer Platinenentstückung	89
Abbildung 5-53:	ADP <sub>fossil</sub> : Anteile der Prozesse der ERR mit chemischer Platinenentstückung an den Gesamtaufwendungen	90
Abbildung 5-54:	ADP <sub>fossil</sub> : Gutschriftenanteile für die ERR mit chemischer Platinenentstückung	91
Abbildung 6-1:	Sensitivität ADP <sub>elementar</sub> : Autosredderroute	95
Abbildung 6-2:	Sensitivität ADP <sub>elementar</sub> : Elektrorecyclingroute	96
Abbildung 6-3:	Sensitivität ADP <sub>elementar</sub> : ERR mit chemischer Platinenentstückung	97
Abbildung 6-4:	Sensitivität Verluste in Aufbereitung und Verhüttung GWP 100: Autosredderroute	98
Abbildung 6-5:	Sensitivität Verluste in Aufbereitung und Verhüttung GWP 100: Elektrorecyclingroute	99
Abbildung 6-6:	Sensitivität Verluste in Aufbereitung und Verhüttung GWP 100: ERR mit chemischer Platinenentstückung	100
Abbildung 6-7:	Sensitivität Verluste in Aufbereitung und Verhüttung ADP <sub>elementar</sub> : Autosredderroute	101
Abbildung 6-8:	Sensitivität Verluste in Aufbereitung und Verhüttung ADP <sub>elementar</sub> : Elektrorecyclingroute	102
Abbildung 6-9:	Sensitivität Verluste in Aufbereitung und Verhüttung ADP <sub>elementar</sub> : Autosredderroute	103

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Charakterisierungsfaktoren für den ADP <sub>elementar</sub>	23
Tabelle 4-1:	Durchschnittliche Zusammensetzung der Leistungselektronik	28
Tabelle 4-2:	Durchschnittlicher Metallgehalt der Platinen sowie Bandbreiten der Untersuchung	30
Tabelle 4-3:	Durchschnittliche stoffliche Zusammensetzung der Leistungselektronik	31
Tabelle 4-4:	Herkunft der prozessspezifischen Daten	32
Tabelle 4-5:	Angenommene Metallverluste in Verhüttung und Aufbereitung bei Anwendung des heutigen Stands der Technik (Abschätzung für Leistungselektronik; nicht übertragbar auf das Gesamtfahrzeug)	33
Tabelle 4-6:	Gegenüberstellung der rezyklierten Materialien, des angelasteten Recyclingprozesses sowie der für das Recyclingmaterial erteilten Gutschrift	36
Tabelle 6-1:	Prozesse mit dem höchsten Gutschriftenbeitrag und zugehörige Hauptemissionen/-ressourcen für alle Routen und Kategorien	93
Tabelle 6-2:	Abnahme der Gutschriften durch Minimierung des Aluminiumanteils	104
Tabelle 6-3:	Differenzen der chemischen Platinenentstückung zur Elektrorecyclingroute über alle Wirkungskategorien	106
Tabelle A-1:	Für die Ökobilanz verwendete generische Datensätze	115



## 1. Zusammenfassung

### Hintergrund der Studie

Das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderte Projekt „Elektrofahrzeugrecycling 2020 - Schlüsselkomponente Leistungselektronik“ kurz ElmoReL 2020 wurde zwischen Dezember 2013 und November 2016 unter der Koordination des Öko-Instituts mit den Verbundpartnern Electrorecycling GmbH, PPM Pure Metals GmbH, TU Clausthal und Volkswagen AG durchgeführt.

Die Eigendarstellung von ElmoReL 2020 findet sich unter:

<http://www.ressourcenfieber.de/project/elektrofahrzeugrecycling-2020-schlueselkomponente-leistungselek.html>

Nach den Vorgängerprojekten zum Recycling von Elektrofahrzeugkomponenten, die sich zum einen mit dem Recycling von Batterien (LiBRi [Buchert 2011a], LithoRec I [Buchert 2011b], LithoRec II [Buchert 2015a], EcoBatRec [Buchert 2015b]) und zum anderen mit elektrischen Fahrtrieben (MORE [Siemens 2014]) beschäftigt haben, beleuchtet dieses Projekt die Leistungselektronik als dritte wichtige Komponente bei Elektrofahrzeugen. Neben dem Recycling der in der Leistungselektronik enthaltenen Massenmetalle wie Aluminium, Eisen und Kupfer stehen vor allem Verfahren zur Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen aus der Leistungselektronik von Elektrofahrzeugen im Vordergrund. Hiermit soll ein möglicher Beitrag zu einer nachhaltigen Versorgung Deutschlands mit strategisch wichtigen Technologiemetallen geleistet werden. Die Ökobilanz dient zur Unterstützung der Bewertung des zukünftigen Recyclings der Leistungselektronik in Elektrofahrzeugen.

Das Öko-Institut war als Koordinator unter anderem für die Konzeption und Realisierung der LCA-Arbeiten und für die Koordination des Gesamtprojekts verantwortlich.

### Recyclingrouten und funktionelle Einheit

Das Projekt betrachtet drei Recyclingrouten für die Leistungselektronik in Elektrofahrzeugen:

1. Das derzeit gängige Autorecycling über den Autos shredder mit nachgelagertem Postshredder ohne vorherigen Ausbau der Leistungselektronik („Autorecyclingroute“)
- 2a. Ausbau der Leistungselektronik mit dem Ziel der mechanischen Aufbereitung bei spezialisierten Elektrogeräte recyclingunternehmen und Verwertung der gewonnenen Sortierfraktionen in Metallhütten. („Elektrorecyclingroute“)
- 2b. Ausbau der Leistungselektronik mit dem Ziel der mechanischen Aufbereitung bei einem spezialisierten Elektrogeräte recyclingunternehmen und einer nachgelagerten chemischen Platinentstückung inkl. Tantalabtrennung sowie einer Verwertung der so gewonnenen Sortierfraktionen in Metallhütten. („Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung“)

Die Systemgrenzen für die Bilanzierung des ElmoReL 2020-Projekts umfassen die folgenden Module für die Autorecyclingroute (siehe Schema auf Seite 16):

- § Shreddern des gesamten Elektrofahrzeugs inklusive Leistungselektronik
- § Post-Shredder-Behandlung zur Sortierung des Shredderguts
- § Entsorgung der Kunststoffe über eine energetische Rückgewinnung (MHKW)
- § Rückgewinnung der Massen-, Edel- und Sondermetalle über Metallhütten

Die Elektrorecyclingroute umfasst folgende Module (siehe Schema auf Seite 17):

- § Ausbau der Leistungselektronik
- § Mechanische Zerlegung via Prallmühle
- § Sortierung der erhaltenen Fragmente
- § Entsorgung der Kunststoffe über eine energetische Rückgewinnung (MHKW)
- § Rückgewinnung der Massen-, Edel- und Sondermetalle über Metallhütten

Die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung umfasst zusätzlich zu den genannten Modulen der Elektrorecyclingroute noch (siehe Schema auf Seite 18):

- § Chemische Platinentstückung
- § Bauteilsortierung
- § Tantalabtrennung

Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss für die Ökobilanzen des ElmoReL 2020-Projekts sind das Recycling von 1000 kg Leistungselektronik inklusive Gehäuse.

Für die Auto- und die Elektrorecyclingroute wird in der Bilanzierung die Anwendung des heutigen Stands der Technik angenommen, um das ökologische Potenzial eines hochwertigen Recyclings abzuschätzen. Die Parameter für die chemische Platinentstückung mit nachfolgender Bauteilsortierung wurden auf Basis von im Projekt durchgeführten Labor- und Technikumsversuchen abgeschätzt.

## Ergebnisse

Die Gesamtauswertung der Ökobilanzergebnisse für das Recycling der Leistungselektronik ergibt unter den gewählten Prämissen für fast alle untersuchten Wirkungskategorien, d. h. Treibhauspotenzial (GWP), Verbrauch an fossilen Ressourcen ( $ADP_{fossil}$ ), Versauerungspotenzial (AP), Eutrophierung (EP) und Bildung von Photooxidantien (POCP), fast immer deutliche Nettogutschriften (Ausnahmen: Verbrauch an abiotischen Ressourcen ( $ADP_{elementar}$ )). Zu diesem Ergebnis tragen vor allem die Gutschriften für die recycelten Metalle bei. Hierbei sind vor allem Aluminium, Kupfer und Gold zu nennen, die hohe Gutschriften beitragen. Die übrigen Metalle haben nur geringe Wirkungen (< 5 %), welche aber dennoch den Recyclingaufwand durch ihre Gutschrift zumeist ausgleichen (Ausnahme:



Tantal). Die Rückgewinnungsraten der Massenmetalle Aluminium und Kupfer haben deutliche Auswirkungen. Die Rückgewinnungsrate der Edel- und Sondermetalle hat vor allem bei Gold hohe Auswirkungen, auch wenn Palladium in den Kategorien Versauerung und photochemische Oxidantienbildung trotz des sehr geringen Massenanteils ( $< 0,0002\%$ ), noch einen überproportional hohen positiven Beitrag ( $> 2\%$ ), bringt.

### Sensitivitätsanalysen

Als wesentliche ergebnisbestimmende Parameter wurden für alle Wirkungskategorien und Routen die Rückgewinnungsquoten für die Metalle identifiziert. Für die Wirkungskategorie ADP elementar ist die Auswahl der Basis für die Charakterisierungsfaktoren von hoher Relevanz. Die entsprechenden Sensitivitätsrechnungen haben gezeigt, dass die Variation dieser Parameter dennoch nicht zu anderen Schlussfolgerungen bzw. zu einer Ergebnisumkehr führt.

### Einschränkungen

In den Systemgrenzen der vorliegenden Ökobilanz ist weder die Herstellung der Leistungselektronik noch deren Nutzungsphase im entsprechenden Fahrzeug bilanziert. Gerade die unterschiedlichen Bauteile der Leistungselektronik und deren Effizienz (z.B. Si- gegenüber GaAs-Transistoren) wären für eine Bilanzierung der Nutzungsphase von Interesse. Aussagen hierzu können jedoch im Rahmen dieser Ökobilanz aufgrund der gesetzten Systemgrenzen nicht getroffen werden. Weiterhin gelten alle Ergebnisse unter der Prämisse, dass die zu recycelnde Leistungselektronik als Abfall ohne Umweltlast aus der Produktion in das Recycling geht.

Die Ökobilanzergebnisse zur Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinenentstückung müssen unter dem Vorbehalt bewertet werden, dass die Sachbilanzdaten teilweise auf Einzel- und Laborversuchen beruhen. Schließlich ist hervorzuheben, dass die Ergebnisse dieser Ökobilanz keinesfalls mit anderen Ökobilanzergebnissen verglichen werden können. Es wurde in diesem Sinne keine vergleichende Ökobilanz durchgeführt.

Die Ökobilanz bildet ein Recycling mit dem heutigen Stand der Technik ab, um die ökologischen Potenziale herauszuarbeiten. Es ist nicht Gegenstand der Untersuchung zu bewerten, inwieweit diese Technologien auch konsequent und flächendeckend angewandt werden.

### Fazit und Empfehlungen

Für das Recycling der untersuchten Leistungselektronik über die drei dargestellten Routen ergeben die Ökobilanzergebnisse für alle Wirkungskategorien deutliche Nettogutschriften. Hier spielen vor allem das Recycling des Aluminiums, des Kupfers sowie des Goldes eine wichtige Rolle, da diese in verschiedenen Kategorien deutlich positive Auswirkungen haben.

Für die erste Route, die Autosshredderroute, zeigen die Ökobilanzergebnisse, dass bei Anwendung des heutigen Stands der Technik in allen Wirkungskategorien deutliche Nettogutschriften erzielt werden können. Dieses Ergebnis beruht vor allem auf hohen Rückgewinnungsquoten für die Massenmetalle Aluminium, Eisen und Kupfer, die durch

eine hochwertige Sortiertechnik beim Autoschredder- und dem Postschredderbetrieb ermöglicht werden.

Für die Route 2a, die Elektrozyclingroute, ergeben sich ebenfalls hohe Nettogutschriften für alle Wirkungskategorien. Dieses positive Ergebnis wird im Wesentlichen durch eine optimierte mechanische Aufbereitung mit der Prallmühle und nachfolgenden Aufbereitungsschritten ermöglicht, die zu vergleichbar hohen Rückgewinnungsquoten bei den Massenmetallen Aluminium, Eisen und Kupfer wie beim Autoschredder führt. Beim Kupfer wird darüber hinaus davon ausgegangen, dass die auf Elektronik optimierte Aufbereitungstechnik auch kleinteilige Bestandteile in der Elektronik vermehrt rückgewinnen kann. Aber auch die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium werden hier mit hohen Verwertungsquoten wiedergewonnen. Ökobilanziell zahlt sich das Edelmetallrecycling in keiner signifikanten Weise aus. Lediglich das erhöhte Recycling von Gold schlägt sich in der Bilanz in den Wirkungskategorien ‚elementarer Ressourcenverbrauch‘ und ‚Eutrophierungspotenzial‘ positiv nieder. Für einen relevanten Anteil in anderen Wirkungskategorien ist der Massenanteil der Edelmetalle an der gesamten Leistungselektronik inkl. Gehäuse zu gering.

Die Route 2b, die Elektrozyclingroute mit chemischer Platinentückung, ergänzt die Route 2a um eine chemische Platinentückung mit einer nachfolgenden Verwertung der Tantalcondensatoren. Die Ergebnisse sind weitgehend identisch mit den Ergebnissen der zweiten Route, da sich die Sachbilanz im Wesentlichen nur durch den zusätzlichen Aufwand der chemischen Platinentückung und die zusätzliche Gutschrift aus der Tantalverwertung unterscheidet. Da die Tantalmengen in der Leistungselektronik sehr klein sind, schlagen sich die Tantalgutschriften nicht nennenswert in der Bilanz nieder. Gleiches gilt für die eingesetzten Chemikalien für die chemische Platinentückung, die im Vergleich zum energieintensiven Aluminiumrecycling nur eine untergeordnete Relevanz haben. Auch wenn die Daten für die chemische Platinentückung aus Laborversuchen hergeleitet wurden und eine entsprechende Datenunsicherheit besteht, kann aus der Ökobilanz bereits abgeleitet werden, dass von einer chemischen Platinentückung keine relevanten ökologischen Vorteile zu erwarten sind. Denn den Vorteilen einer zusätzlichen Tantalrückgewinnung stehen entsprechende Aufwendungen für die eingesetzten Lösemittel gegenüber.

## 2. Hintergrund der Studie und Aufbau des Berichts

Die Ökobilanz ist als begleitende Untersuchung für die möglichen Recyclingwege von Leistungselektronik aus dem Automobilsektor angelegt. Hier sind neben den Massenmetallen Aluminium, Eisen und Kupfer vor allem das Recycling der Edel- und Sondermetalle Gold, Silber, Palladium, Zinn und Tantal im Fokus.

Das Projekt ElmoReL 2020 wurde zwischen Dezember 2013 und November 2016 unter der Koordination des Öko-Instituts mit den Verbundpartnern Electroycling GmbH, PPM Pure Metals GmbH, TU Clausthal und Volkswagen AG durchgeführt.

Die Eigendarstellung von ElmoReL 2020 findet sich unter:

<http://www.ressourcenfieber.de/project/elektrofahrzeugrecycling-2020-schluesselekomponente-leistungselek.html>

In den Vorgängerprojekten zum Recycling von Elektrofahrzeugkomponenten lag der Fokus zum einen auf dem Recycling von Batterien, welches im Projekt LiBRi [Buchert 2011a] von 2009 bis 2011, im Projekt LithoRec I [Buchert 2011b] von 2009 bis 2011, im Projekt LithoRec II [Buchert 2015a] von 2011 bis 2016 und im Projekt EcoBatRec [Buchert 2015b] von 2011 bis 2016 detailliert betrachtet wurde. Zum anderen wurde das Recycling von elektrischen Fahrtrieben im Projekt MORE [Siemens 2014] von 2011 bis 2014 näher untersucht. Bei all diesen Projekten wurde unter anderem eine Bewertung der Prozesse mittels Ökobilanzen vorgenommen. Im Projekt ElmoReL 2020 stehen nun Recyclingwege der dritten wichtigen Komponente der Elektrofahrzeuge, der Leistungselektronik, im Fokus, welche ebenfalls ökobilanziell untersucht werden sollen. Im November 2013 wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit das ElmoReL 2020-Forschungsprojekt zur Förderung ausgewählt, um die Recyclingwege von Leistungselektronik aus Elektrofahrzeugen zu analysieren und neue optimierte Verfahren zu entwickeln.

Das Öko-Institut war für die Konzeption und Realisierung der Ökobilanz verantwortlich. Die Projektpartner haben bei der Erstellung der Sachbilanz maßgeblich mitgewirkt. Die Abstimmung methodischer Fragen (funktionelle Einheit, Systemgrenzen, Wirkungskategorien usw.) sowie die gemeinsame Diskussion der Ökobilanzergebnisse erfolgten in Rücksprache mit den Projektpartnern.

Die Ökobilanz bzgl. der drei Recyclingrouten wurde gemäß ISO 14040/14044 sowie ISO TS 14071 durchgeführt. Die Aufgabe des unabhängigen externen Critical Reviewers wurde von Prof. Dr. Matthias Finkbeiner von der TU Berlin, Department of Environmental Technology – Chair of Sustainable Engineering, ausgeführt, der die kritische Prüfung als unabhängiger Gutachter und nicht als Vertreter oder im Auftrag der TU Berlin erstellt hat.

Die nachfolgenden Abschnitte dieses Berichtes beschreiben die Ziele und den Untersuchungsrahmen (Abschnitt 3), umfassen die Sachbilanz (Abschnitt 4) und die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Abschnitt 5) sowie die Auswertung (Abschnitt 6) und die zitierten Referenzen (Abschnitt 7). Der Bericht wird durch mehrere Anhänge komplettiert: Annex 1 listet die verwendeten generischen Datensätze auf. Annex 2 umfasst die finale Prüfaussage des Critical Review (Prof. Finkbeiner).

### **3. Ziele und Untersuchungsrahmen**

#### **3.1. Ziele und Anwendungen der Studie**

Die Ökobilanz dient zur Unterstützung der Bewertung des zukünftigen Recyclings der Leistungselektronik in Elektrofahrzeugen im Rahmen des ElmoReL 2020-Projektes. Die im Projekt entwickelten Verfahrensschritte sowie die möglichen Recyclingrouten sollen ökobilanziell analysiert werden, um zu zeigen, welche Route an welchen Stellen welche Umweltauswirkungen aufweist. Weiterhin dienen die Arbeiten zur Ökobilanz dazu, frühzeitig Hot Spots in den Recyclingwegen zu identifizieren, um diese in Zukunft zu vermindern und

die Umweltperformance der einzelnen Routen zu verbessern. Hierzu wurde nicht zuletzt auch eine Sensitivitätsanalyse bzgl. der Ökobilanz durchgeführt und bewertet. Darüber hinaus zeigt die Ökobilanz die Potenziale des Recyclings hinsichtlich Ressourceneinsparung und Umweltentlastungen bei Anwendung des aktuellen Stands der Technik und der neu entwickelten Verfahrensschritte auf.

Es ist ausdrücklich nicht Ziel der Studie, die unterschiedlichen Recyclingrouten für die Leistungselektronik miteinander zu vergleichen. Die vorliegende Studie stellt in diesem Sinne keine vergleichende Ökobilanz dar. Die Ergebnisse dieser Studie sind nicht für die Verwendung in zur Veröffentlichung vorgesehenen vergleichenden Aussagen bestimmt.

Eine wichtige Zielgruppe für die Ökobilanzstudie sind die Verbundpartner des ElmoReL 2020-Projektes selbst. Für die Verbundpartner sind die Teilergebnisse für die einzelnen Module der Recyclingrouten ebenso interessant wie die Gesamtergebnisse. Schließlich ist die Identifizierung möglicher ökologischer Optimierungspotenziale bzgl. des Recyclings von elementarer Bedeutung.

Eine weitere Zielgruppe für die Ergebnisse sind das fördernde BMUB selbst und die interessierte Fachöffentlichkeit. Für die Politik sind vor allem Erkenntnisse bzgl. noch offenen Forschungsbedarfs und ggf. weiterer Förder- und Entwicklungsprogramme wichtig.

## 3.2. Festlegung des Untersuchungsrahmens

### 3.2.1. Funktion und funktionelle Einheit

Die im ElmoReL 2020-Projekt betrachteten Recyclingrouten inklusive der betrachteten Optimierungsmöglichkeiten haben als Ziel, die größtmögliche Rückgewinnung von Metallen zu erreichen. Aufgrund der komplexen Zusammensetzung der Leistungselektronik ist die werkstoffliche Rückgewinnung von weiteren Materialien (z.B. aus dem Gehäuse) sowie ggf. die energetische Verwertung spezifischer Bestandteile der Leistungselektronik für die Ökobilanz ebenfalls zu betrachten und zu bilanzieren.

Da im Bereich der Elektromobilität bedingt durch die unterschiedlichen Hersteller ein gewisses Spektrum an inhaltlichen Bestandteilen in der Leistungselektronik existiert, wurden zu Projektbeginn von der TU Clausthal verschiedenste Leistungselektronikeinheiten auf ihre Zusammensetzung hin analysiert. Das in diesen Analysen ermittelte Durchschnittsgewicht (12,7 kg) sowie die Durchschnittszusammensetzung wurden dieser Ökobilanz zugrunde gelegt. Die konkreten Daten bzgl. der Zusammensetzung der Leistungselektronik finden sich in Kapitel 4.2.1 dieses Berichts. Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss für die Ökobilanzen des ElmoReL 2020-Projekts ist das Recycling von 1000 kg Leistungselektronik über die drei Routen Autoshreder, Elektrorecycling und Elektrorecycling mit chemischer Platinenentstückung. Hierbei ist zu beachten, dass in der Autoshrederoute das gesamte Fahrzeug zerkleinert wird. In dieser Ökobilanz wird nur der anteilige Aufwand für das Zerkleinern der Leistungselektronik bilanziert. Um 1000 kg Leistungselektronik zu erhalten müssen rund 79 Fahrzeuge verwertet werden.

Die funktionelle Einheit in dieser Ökobilanz ist kein Produkt, sondern der Service des Recyclings von 1000 kg Leistungselektronik, da für diese Ökobilanz der Fokus auf den Recyclingrouten und nicht auf den Recyclingprodukten liegt.

### 3.2.2. Festlegung der Systemgrenzen

Jede der drei betrachteten Recyclingrouten wird in einem ähnlichen Systemrahmen bilanziert. Auf der einen Seite liegt die Systemgrenze beim Anfall der gebrauchten Leistungselektronik, auf der anderen Seite bei der Verwertung inklusive Gutschriften und Entsorgung von nicht zu verwertenden Stoffen. Beim Anfall der gebrauchten Leistungselektronik gibt es den Unterschied, dass bei Route 1 keine Demontage aus dem Altfahrzeug erfolgt, während dies bei Route 2a und 2b einen zusätzlichen Verfahrensschritt darstellt. Bei der Verwertung gibt es Unterschiede bezüglich der Rückgewinnungsraten der Metalle (Kupfer, Silber, Gold, Zinn, Palladium), wobei nur in Route 2b zusätzlich Tantal rückgewonnen wird.

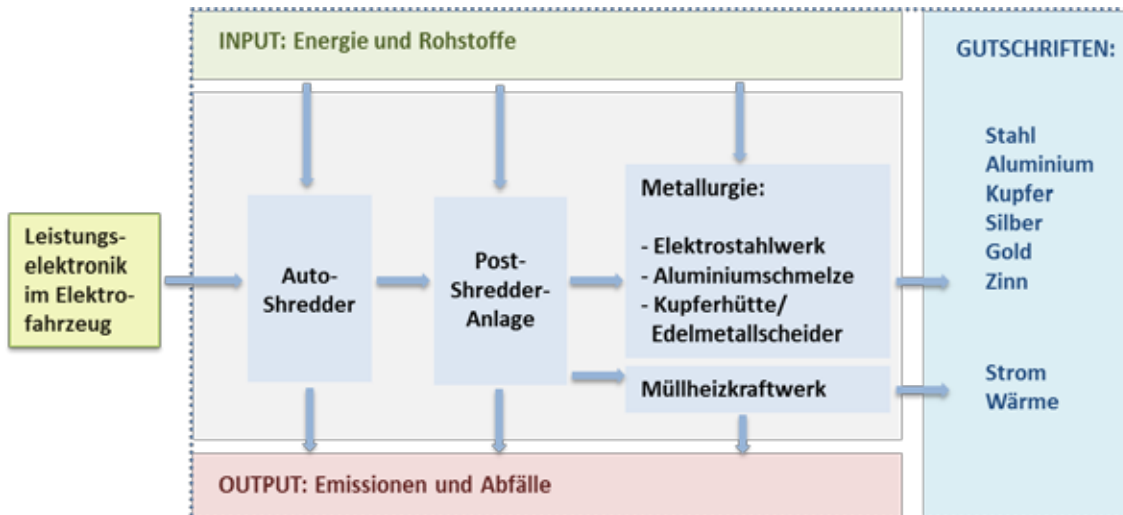
#### Route 1: Autorecyclingroute

Für die Autorecyclingroute werden folgende Module betrachtet:

- § Shreddern des gesamten Elektrofahrzeugs inklusive Leistungselektronik, wobei nur der anteilige Aufwand für die Leistungselektronik betrachtet wird
- § Post-Shredder-Behandlung zur Sortierung des Shredderguts
- § Entsorgung der Kunststoffe über eine energetische Rückgewinnung (MHKW)
- § Rückgewinnung der Massen-, Edel- und Sondermetalle über Metallhütten

Die Prozessschritte der Autorecyclingroute und die Systemgrenze der vorliegenden Ökobilanz sind in Abbildung 3-1 dargestellt.

Abbildung 3-1: Systemgrenze der Autorecyclingroute, FU: Recycling von 1000 kg EoL-Leistungselektronik



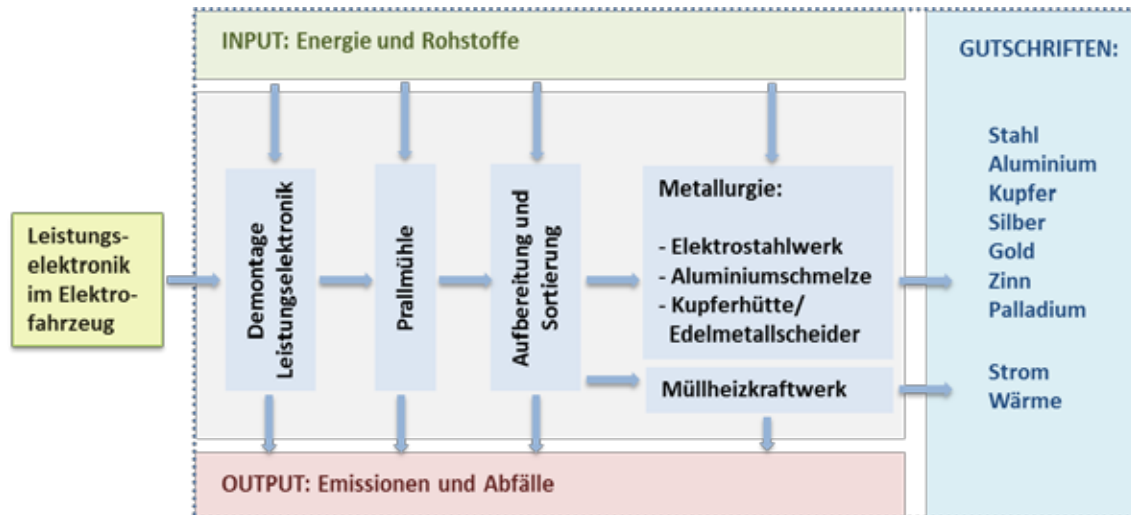
### Route 2a: Elektrorecyclingroute

Die Elektrorecyclingroute umfasst folgende Module:

- § Ausbau der Leistungselektronik
- § Mechanische Zerlegung via Prallmühle
- § Sortierung der erhaltenen Fragmente
- § Entsorgung der Kunststoffe über eine energetische Rückgewinnung (MHKW)
- § Rückgewinnung der Massen-, Edel- und Sondermetalle über Metallhütten

Die Prozessschritte der Elektrorecyclingroute und die Systemgrenze der vorliegenden Ökobilanz sind in Abbildung 3-2 dargestellt.

**Abbildung 3-2: Systemgrenze der Elektrorecyclingroute, FU: Recycling von 1000 kg EoL-Leistungselektronik**



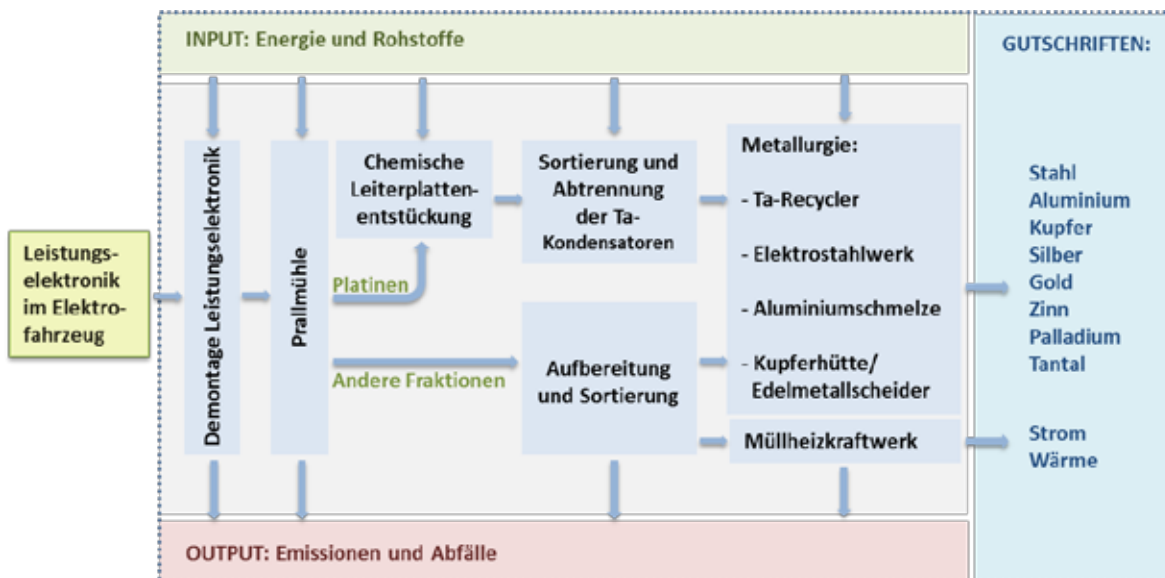
Route 2b: Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung

Die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung umfasst zusätzlich zu den genannten Modulen der Elektrorecyclingroute noch:

- § Ausbau der Leistungselektronik
- § Mechanische Zerlegung via Prallmühle
- § Chemische Platinentstückung
- § Sortierung der erhaltenen Fragmente und Bauteile
- § Entsorgung der Kunststoffe über eine energetische Rückgewinnung (MHKW)
- § Tantalabtrennung
- § Rückgewinnung der Massen-, Edel- und Sondermetalle über Metallhütten

Die Prozessschritte der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung und die Systemgrenze der vorliegenden Ökobilanz sind in Abbildung 3-3 dargestellt.

**Abbildung 3-3: Systemgrenze der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung, FU: Recycling von 1000 kg EoL-Leistungselektronik**



Die Aufwendungen des Recyclingprozesses finden bei allen drei Routen innerhalb der Systemgrenze statt. Sie werden mit den Gutschriften für die das System verlassenden Produkte (z.B. Stahl oder Strom) verrechnet, um die Nettowirkung der jeweiligen Recyclingroute zu erhalten. Zur Modellierung der Gutschriften siehe Kapitel 4.2.4

Die Herstellungs- und Nutzungsphase der untersuchten Leistungselektronik sind nicht Gegenstand dieser Ökobilanz und liegen deshalb außerhalb der Systemgrenze.

### 3.2.3. Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität

Die Datenerhebung für die Primärdaten der Sachbilanzen wurde in Zusammenarbeit mit den ElmoReL 2020-Projektpartnern durchgeführt. Ein Teil der Sachbilanzdaten für die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung beruht auf Labordaten bzw. Modellierungen. Die übrigen Daten wurden gemessen oder von den Projektpartnern auf Basis von Praxiserfahrungen abgeschätzt.

Weitere Sachbilanzdaten werden überwiegend aus der Datenbank ecoinvent v3.1 entnommen. Ausnahmen sind die Nachmodellierungen der Gewinnung von Tantal- und Zinnerz, welche auf Basis der Dokumentationen zu ecoinvent 2.1 durchgeführt wurden.

In der Datenerhebung wird als Abschneidekriterium in der Regel eine „1-Prozentregel“ bezüglich Masse verfolgt, das heißt, es werden z. B. entsprechende Hilfsstoffeinsätze



bezogen auf den jeweiligen Gesamteinsatz mit einem Anteil  $< 1$  % vernachlässigt. Ausnahmen hierzu wurden gemacht, falls relevante Gründe, wie z.B. eine hohe Umweltwirkung, die Einbeziehung in die Sachbilanz nahelegten.

### Technologische Repräsentativität

Die Daten für die Recyclingrouten entsprechen dem aktuellen Stand von Forschung und Entwicklung bei der Anwendung des aktuellen Stands der Technik. Die Daten basieren auf Primärdaten der involvierten Projektpartner sowie deren Abschätzungen auf Basis von Praxiserfahrungen. Die Daten der chemischen Platinenentstückung sind aus Laborversuchen abgeleitet.

### Geographische Repräsentativität

Die Ökobilanz der Recyclingrouten hat nach Abstimmung mit den Projektpartnern den geographischen Bezug Deutschland. Entsprechend wurden geeignete einschlägige externe Datensätze (Strommix Deutschland etc.) für die Sachbilanz herangezogen. Für die Bilanzierung eingesetzter Hilfsstoffe etc. (z. B. anorganische Chemikalien) wurde soweit wie möglich auf Datensätze mit Bezug auf deutsche und falls nicht vorhanden auf europäische bzw. falls auch nicht vorhanden auf weltweite Produktion zurückgegriffen.

Für die Gutschriften der Metalle werden weltweite bzw. generische LCA-Daten herangezogen, soweit es dem deutschen oder europäischen Metallbezug entspricht.

### Zeitrepräsentativität

Die zeitliche Repräsentativität der Studie ist der aktuelle Anlagen- und Entwicklungsstand. Die Studie verliert ihre Gültigkeit, sobald sich hier wichtige Verfahrensparameter ändern. Die verwendeten Sekundärdaten sollen deshalb nicht älter als 5 Jahre sein. Datensätze aus ecoinvent v3.1 stammen aus den letzten 10 Jahren. Alle internen Daten bzgl. der Recyclingrouten wurden im Jahr 2015 und 2016 erhoben.

Die LCA für das Modul der chemischen Platinenentstückung hat einen prospektiven Charakter, da sie nicht nur den aktuellen Stand, sondern auch zukünftige Prozesse abzubilden versucht, die in der Praxis noch nicht implementiert sind. Aus den Laborergebnissen sind die Prozesse bekannt, die Ergebnisse aus ihren konkreten großtechnischen Umsetzungen hingegen nicht. Es wird deshalb für die Sachbilanz der chemischen Platinenentstückung auf Laborergebnisse zurückgegriffen.

Darüber hinaus bewegt sich die Unsicherheit der Daten im üblichen Rahmen und unterscheidet sich je nach Elementarfluss.

### 3.2.4. Allokation

Unter Allokation werden bei der Durchführung von Ökobilanzen Zuordnungsverfahren verstanden, die dann erforderlich sind, wenn bei Prozessen mehrere verwertbare Produkte erzeugt werden, aber nur ein Teil der Produkte in dem betrachteten ökobilanziellen System genutzt wird. Sie wird immer dann durchgeführt, wenn eine Systemerweiterung praktisch nicht mehr möglich ist. Allokationen führen immer zu einer eingegrenzten Betrachtungsweise. Klassische Beispiele für Allokationen sind der Chloralkaliprozess oder die Erdölraffination.

So werden in der Erdölraffination aus dem Hauptinput Erdöl viele Raffinerieprodukte wie Benzin und Diesel, aber auch Naphtha, schweres Heizöl und andere erzeugt. Bei der Raffinerie werden aufgrund der Komplexität die gesamten ökologischen Aufwendungen auf die Gesamtprodukte anhand eines Kriteriums umgelegt, z. B. über den Heizwert. Dieses Verfahren ist allgemein akzeptiert und entspricht der ISO-Norm, indem einer Allokation nach physikalischen Größen der Vorzug gegeben wird.

Dieses Verfahren stößt allerdings bei Bunt- und Edelmetallen häufig an seine Grenze. So werden bei der Förderung und Herstellung von Edelmetallen (z. B. Platin, Palladium) auch andere Metalle (Kupfer, Nickel) produziert. Würde man für diese Prozesse eine Allokation nach einem physikalischen Kriterium (Masse) wählen, so würden die Aufwendungen gleichmäßig auf Edelmetalle und Begleitmetalle aufgeteilt. Diese Aufteilung widerspräche allerdings der Ökonomie des Verfahrens. Für dieses Verfahren steht daher entweder das Gutschriftenverfahren (meistens nicht praktikabel) oder eine Allokation nach Erlösen zur Verfügung. In diesen letztgenannten Verfahren werden die Umweltauswirkungen nach Erlösen den Produkten zugeordnet. Da die Metalle Preisschwankungen unterliegen, muss bei der Anwendung hier Vorsicht gelten.

In der vorliegenden Studie wurde wie folgt vorgegangen:

Die Bilanzierung innerhalb der Systemgrenzen „Recycling von Leistungselektronik“ erfordert für den Betrieb des Autoshridders und des Müllheizkraftwerks (MHKW) eine Massenallokation, da die genutzten Aggregate nicht ausschließlich für das Recycling der Leistungselektronik allein genutzt werden. Für den Shredder wird nur die Masse an geschreddeter Leistungselektronik betrachtet und für das MHKW – aufgrund vergleichbarer Heizwert - ebenfalls nur die Masse an Kunststoffen, welche dort einer thermischen Verwertung zugeführt werden.

Die Literaturdaten zur Bilanzierung von Rohstoffen und Gutschriften bestehen aus von ecoinvent v3.1 übernommenen Datensätzen, für die in einigen Fällen bereits physikalische, monetäre oder andere Allokationen vorgenommen worden sind. Soweit diese keinen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis haben, werden sie hier nicht explizit aufgeführt und können der entsprechenden Dokumentation in ecoinvent v3.1 [ecoinvent v3.1] entnommen werden.

### **3.2.5. End-of-Life Allokation**

Die Systemgrenzen dieser Ökobilanz sind so angelegt, dass alle Ströme, die das System verlassen und keine Emissionen darstellen, über Gutschriften bewertet werden. Der Auswahl und Modellierung der Gutschriftprozesse kommt daher bei dieser Ökobilanz eine zentrale Rolle zu.

Da die funktionelle Einheit in dieser Betrachtung das Recycling einer Tonne Leistungselektronik ist und ein Re-Use oder ein Teilerecycling nicht angedacht ist, wird von einer Sensitivitätsrechnung mit der 50:50-Methode, wie sie das Umweltbundesamt empfiehlt [UBA 2002] [Klopffer 2009] abgesehen. Stattdessen geht die gebrauchte Leistungselektronik in der Bilanzierung lastenfrei ins Recycling, um die Methodik mit den vorangegangenen Studien, z.B. [Buchert 2015a], konsistent zu halten. Alle Ergebnisse dieser Studie gelten nur

für diesen End-of-Life-Allokationsansatz. Für Studien, welche die Ergebnisse der Studie ggf. weiterverwenden, ist aus Konsistenzgründen zu beachten, dass das Sekundärmaterial nicht lastenfrei, sondern mit einer der in dieser Studie erteilten Gutschrift entsprechenden Lastschrift eingehen muss.

Neben dem hier verwendeten Ansatz existieren noch Recycled-Content-und der PEF-Ansatz [Allacker 2014] [Ekvall 1997] [Finnveden 2009] [Frischknecht 2010] [Kim 1997] [Klöpper 1996] [Vogtlander 2001].

### 3.2.6. Berücksichtigte Wirkungskategorien

Von den einzelnen Schritten des Recyclings von der Leistungselektronik aus Elektrofahrzeugen können unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt ausgehen. Diese möglichen Auswirkungen sind bei der Schadstoffbewertung in der Wirkungsabschätzung zu berücksichtigen. Die Aufgabe der Wirkungsabschätzung ist es, die in der Sachbilanz erhobenen Daten in Hinblick auf bestimmte Umweltauswirkungen, sogenannte Wirkungskategorien, zu untersuchen und damit zusätzliche Informationen zu liefern, die in die Bewertung einfließen. Der PEF Guide [EC 2013] führt folgende Standardwirkungskategorien auf:

- § Klimaänderung
- § Abbau der Ozonschicht
- § Ökotoxizität - Süßwasser
- § Humantoxizität - kanzerogene Folgen
- § Humantoxizität - nichtkanzerogene Folgen
- § Feinstaub/anorganische Emissionen
- § Ionisierende Strahlung - Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit
- § Fotochemische Bildung von Ozon
- § Versauerung
- § Eutrophierung – Land
- § Eutrophierung – Wasser
- § Ressourcenerschöpfung – Wasser
- § Ressourcenerschöpfung – mineralisch, fossil
- § Landnutzungsänderungen

Das ILCD-Handbuch [ILCD 2010] empfiehlt diese Wirkungskategorien:

*Climate change, (Stratospheric) Ozone depletion, Human toxicity, Respiratory inorganics, ionizing radiation, (Ground-level) Photochemical ozone formation, Acidification (land and water), Eutrophication (land and water), Ecotoxicity, Land use, Resource depletion (minerals, fossil and renewable energy resources, water).*

Weitere Wirkungskategorien sind z. B. Geruchsbelästigung, Lärm, Belastung am Arbeitsplatz, Abwärme und Abfallaufkommen, Bedrohung von Naturschönheit und –vielfalt [UBA 1995].

Bezüglich der zu betrachtenden Wirkungskategorien führt die Fachliteratur aus:

*Da ISO 14044 keine feste Liste von Wirkungskategorien vorgibt, nicht einmal eine Empfehlungsliste, obliegt die Auswahl der Kategorien den Erstellern der Ökobilanz. [Klopffer 2009]*

Die Auswahl der Wirkungskategorien für die vorliegenden Ökobilanzen der Recyclingverfahren für die Leistungselektronik aus Elektrofahrzeugen führte in Abstimmung mit den Projektpartnern zu folgendem Ergebnis. In Anpassung an die Thematik und die bestehenden Fragestellungen bzgl. der Recyclingverfahren wurden die folgenden Wirkungskategorien als Grundlage der Ökobilanzierung verwendet: Verbrauch an abiotischen Ressourcen fossilen Typs (ADP, fossil), Verbrauch an abiotischen Ressourcen mineralischen Typs (ADP, elementar, ultimative Reserven), Klimaerwärmungspotenzial (GWP), Eutrophierungspotenzial (EP), Versauerungspotenzial (AP), Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP).

Zur Charakterisierung von human- und ökotoxischen Belastungen sind in den letzten Jahren eine Reihe von methodischen Konzepten erarbeitet worden. Neben klassischen Methoden wie CML [Guinée 2002] und EDIP [Hauschild 1998], die potenzielle Wirkungen in der Mitte des Wirkungsmechanismus quantifizieren, versuchen andere Methoden potenzielle Schäden am Wirkungsendpunkt abzuschätzen, wie z.B. Eco-indicator 99 [Goedkoop 1999] oder EPS [Steen 1999] oder kombinieren beide Konzepte, wie z. B. ReCiPe [Goedkoop 2009], IMPACT 2002+ [Humbert 2012].

Mit dem USEtox Modell der UNEP/SETAC Life Cycle Initiative [Rosenbaum 2011, Rosenbaum 2008, Hauschild 2008] wurde versucht, die verschiedenen Modelle zu harmonisieren. USEtox stellt ein Bewertungssystem dar für die Kategorien Humantoxizität und aquatische Ökotoxizität. Das Modell stellt sehr hohe Anforderungen an die Datenqualität und die Anzahl der zu betrachtenden Stoffe. Da die Datenlage zu zahlreichen human- und ökotoxischen Stoffen so schlecht ist, dass fundierte Aussagen nur schwer abzuleiten sind, wird in dieser Studie auf die Einbeziehung der Humantoxizität und Ökotoxizität anhand einer Wirkungsabschätzung verzichtet.

Die Wirkungskategorien „Respiratory inorganics“, „Flächenverbrauch“, „Geruchsbelästigungen/Lärm“, „Belastungen am Arbeitsplatz“ sowie „Bedrohung von Naturschönheit und –vielfalt“ werden für die Ökobilanz nicht berücksichtigt, da diese spezifischen Wirkungen für das betrachtete System nicht verlässlich quantifiziert werden können.

Abwärme wird aus Gründen fehlender Relevanz für das untersuchte System nicht berücksichtigt. Das Abfallaufkommen wird als Flussgröße erfasst. Der anfallende Abfall wird behandelt und die resultierenden Umweltbelastungen in den entsprechenden Wirkungskategorien quantifiziert.

Für diese Studie wird die LCIA-Methode CML [CML 2015] verwendet, da dies konsistent mit den Vorstudien ist, z.B. [Buchert 2015a], die Methode regelmäßig aktualisiert wird sowie alle Wirkungskategorien, die für diese Studie von Interesse sind, beinhaltet.

Nachfolgend werden die in der Ökobilanz verwendeten Wirkungskategorien vorgestellt.

Hinsichtlich des Verbrauchs an Ressourcen wird einerseits der Verbrauch an energetischen Ressourcen über die Kategorie abiotischer Ressourcenverbrauch fossilen Typs ( $ADP_{fossil}$ , engl. *abiotic depletion potential, fossil*) abgebildet.  $ADP_{fossil}$  ist ein Maß für den gesamten Verbrauch an energetischen Ressourcen fossiler Art, die für die Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung benötigt werden. Im  $ADP_{fossil}$  enthalten ist auch der fossile Energiegehalt, der im Produkt selbst enthalten ist. In der vorliegenden Ökobilanz werden mit dem  $ADP_{fossil}$  die nicht erneuerbaren energetischen Ressourcen berücksichtigt (Uran wird im  $ADP_{elementar}$  betrachtet). Zur Berechnung wird der untere Heizwert der verschiedenen Energieträger angesetzt. Der Verbrauch an **abiotischen Ressourcen mineralischen Typs** ist bzgl. der betrachteten Recyclingverfahren ebenfalls eine wichtige Wirkungskategorie, da die betrachteten Recyclingverfahren auf die Rückgewinnung wertvoller Sekundärmetalle zielen und damit primäre Metallressourcen einsparen sollen. Hierfür wurde für Ökobilanzen der Wirkungsparameter  $ADP_{elementar}$  ( $ADP_{elementar}$ , engl. *abiotic depletion potential, elements*) entwickelt. In der vorliegenden Studie wird die Definition des  $ADP_{elementar}$  aus der Basismethode des Dutch LCA Handbook [Guinée 2001] mit den Charakterisierungsfaktoren nach [CML 2015] verwendet. Das  $ADP_{elementar}$  berechnet sich dementsprechend als Quotient aus der Extraktionsrate einer Ressource und dem Quadrat der „ultimate reserve“<sup>1</sup> dieser Ressource ( $ADP_{elementar,ur}$ ). Bezogen wird auf Antimonäquivalente.

Die Charakterisierungsfaktoren für die in dieser Studie relevanten Metalle sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

**Tabelle 3-1: Charakterisierungsfaktoren für den  $ADP_{elementar}$**

Element	$ADP$ (kg Sb-eq. / kg)
Aluminium	1,09E-09
Eisen	5,24E-08
Gold	5,20E+01
Kupfer	1,37E-03
Palladium	5,71E-01
Silber	1,18E+00
Tantal	4,06E-05
Zinn	1,62E-02

Die Berechnung des Klimaerwärmungspotenzials (GWP) in Form von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten wird allgemein anerkannt. Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) besteht

<sup>1</sup> Weitestgehende Definition von Reserve.

zudem ein internationales Fachgremium, das sowohl die Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für klimawirksame Substanzen errechnet und fortschreibt. Bei der Berechnung von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten wird die Verweilzeit der Gase in der Troposphäre berücksichtigt; daher stellt sich die Frage, welcher Zeitraum der Klimamodellrechnung für die Zwecke der Ökobilanz verwendet werden soll. ISO TS 14067 [ISO 2013] legt die Modellierung auf der 100-Jahre-Basis fest. Die in den Berechnungen des Klimaerwärmungspotenzials berücksichtigten Substanzen werden mit ihren CO<sub>2</sub>-Äquivalenzwerten nach [IPPC 2013] bewertet, welche in [CML 2015] integriert sind.

Die Eutrophierung steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß, sowohl für Gewässer als auch für Böden. Im vorliegenden Projektzusammenhang wird der Nährstoffeintrag über Luft und Wasser (bzw. Boden) betrachtet. Das Eutrophierungspotenzial (EP) von Nährstoffemissionen wird hierbei durch die Aggregation von Phosphat-Äquivalenten nach [CML 2015] ermittelt.

Eine Versauerung kann ebenfalls sowohl bei terrestrischen als auch bei aquatischen Systemen eintreten. Verantwortlich sind die Emissionen säurebildender Abgase. Die Berechnung erfolgt in Form von Säurebildungspotenzialen (AP, [CML 2001]) mit den Charakterisierungsfaktoren nach [CML 2015].

Die Wirkungskategorie Photooxidantien (Photochemical Ozone Creation Potential, Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial, POCP) bildet die Entstehung von Sommersmog oder bodennahem Ozon ab. Ozon führt zu Wald- und Vegetationsschäden. In höheren Konzentrationen ist es humantoxisch (Reizung der Atmungsorgane, Asthma, Husten und Augenreizung) [Schmid 2006]. Die Ozonbildung ist ein komplexer Prozess, bei dem den Kohlenwasserstoffen ein Ozonbildungspotenzial zugewiesen werden kann. Genaue Potenziale gelten nur für eine definierte Umgebung mit einer bestimmten Lichtintensität, einer bestimmten NO<sub>x</sub>-Konzentration und definierten meteorologischen Bedingungen. In der Ökobilanzierung werden als Mittelwerte die Wirkfaktoren nach [CML 2015] angesetzt, die auf 1 kg Ethen-Äquivalent bezogen werden.

Die von der EU-Kommission vorgeschlagenen Indikatoren und Methoden zum Product and Organisation Environmental Footprint [EC 2014] wurde in dieser Studie nicht angewendet, da bei PEF/OEF derzeit noch Widersprüche zur ISO-Norm 14044 bestehen (siehe [Lehmann 2015]).

### 3.2.7. Methoden der Auswertung

Die Auswertung wird entsprechend der in ISO 14040/44 geforderten Bestandteile durchgeführt. Diese umfassen:

- § Identifizierung der signifikanten Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzungsphasen der Ökobilanz;
- § eine Beurteilung, die die Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen berücksichtigt;
- § Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen.

### **3.2.8. Konformität und kritische Prüfung**

Die vorliegende Ökobilanz wurde entsprechend den einschlägigen Vorgaben der ISO 14040/14044 sowie ISO TS 14071 durchgeführt und kritisch geprüft. Wie in Abschnitt 3.1 ausgeführt, entfallen die spezifischen Anforderungen an vergleichende Ökobilanzen, da Vergleiche unterschiedlicher Recyclingrouten nicht intendiertes Ziel der vorliegenden Ökobilanzstudie sind. Die Arbeiten zur Ökobilanz wurden durch einen unabhängigen, externen Critical Reviewer (Prof. Dr. Finkbeiner), der auf einschlägige und umfassende Kenntnisse und Erfahrungen der methodischen Anforderungen an Ökobilanzen und deren Weiterentwicklung verweisen kann, mit Empfehlungen unterstützt. Die Prüfung erfolgte studienbegleitend gemäß Abschnitt 6.2 der ISO 14044. Eine Validierung des LCI-Modells oder die Verifizierung der verwendeten Daten war nicht Gegenstand der Prüfung. Das die Prüfaussage enthaltende Gutachten wird in den Anhang des Berichtes aufgenommen.

### **3.2.9. Einschränkungen**

Als wesentliche Einschränkung bzgl. der Ergebnisse der vorliegenden Ökobilanzstudie ist darauf zu verweisen, dass Sachbilanzdaten für bestimmte Module aus Labor- und Technikumsversuchen abgeleitet wurde und somit Daten aus industriellem Betrieb noch fehlen. Eine weitere Einschränkung besteht in der Vielfalt in der Zusammensetzung der in Frage Leistungselektronik und der auf die Zukunft nicht einfach zu prognostizierenden Marktentwicklungen hierzu. Nichtsdestoweniger wurde in konstruktiver und gemeinsamer Arbeit der Partner des ElmoReL 2020-Projekts diese Einschränkung durch die Abstimmung auf eine geeignete gemittelte Zusammensetzung der Leistungselektronik soweit wie möglich adressiert.

Die Ergebnisse der Ökobilanz gelten nur für den gewählten EoL-Ansatz, dass die gebrauchte Leistungselektronik lastenfrei ins Recycling geht.

### **3.2.10. Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts**

Wie in Abschnitt 2 beschrieben, orientiert sich die Art und der Aufbau des Berichts (Abschnitte 3, 4, 5 und 6) konsequent an den vier Phasen einer Ökobilanz. Der Bericht wird in den gemeinsamen Abschlussbericht des Projektkonsortiums integriert und publiziert.

## **4. Sachbilanz**

### **4.1. Prozessbeschreibung**

Die untersuchten Recyclingprozesse im Projekt ElmoReL 2020 lassen sich grob in vier Hauptprozessschritte aufgliedern:

- § Ausbau der Leistungselektronik
- § Zerlegung der Leistungselektronik
- § Separation und Aufbereitung der einzelnen Fraktionen

§ Recycling der einzelnen Fraktionen zur Rückgewinnung der Metalle

### Ausbau der Leistungselektronik

Bei den Routen 2a und 2b (Elektrorecyclingroute mit und ohne chemische Platinenentstückung) wird die Leistungselektronik beim Autoverwerter, der die Schadstoffentfrachtung durchführt, händisch ausgebaut (Lösen von Schrauben bzw. Durchschneiden von Kabeln). Der nachfolgende Transport vom Demontagebetrieb zum Elektrorecycler wird für die Elektrorecyclingrouten in der Sachbilanz berücksichtigt. Bei der Route 1 (Autoshredder) erfolgt keine händische Demontage der Leistungselektronik und die Leistungselektronik wird gemeinsam mit dem Altfahrzeug im Autoshredder verwertet.

### Zerlegung der Leistungselektronik

Bei Route 1 (Autoshredder) wird die Leistungselektronik gemeinsam mit dem gesamten Altfahrzeug im Autoshredder in Fragmente zerlegt. Es wird nur der Aufwand für die Leistungselektronik betrachtet. Bei den Routen 2a und 2b (Elektrorecyclingroute mit und ohne chemische Platinenentstückung) wird die Leistungselektronik mit einer Prallmühle zerlegt. Der Projektpartner Electrorecycling hat hierzu gezielte Versuche durchgeführt. Der Output dieser Zerlegungsschritte wird bei allen drei Routen im nächsten Schritt aufgearbeitet. Bei der Zerlegung wird Energie (Strom, Diesel) für den Betrieb der Autoshredderanlage bzw. der Prallmühle inklusive Gabelstaplerbetrieb benötigt.

### Separation und Aufbereitung der einzelnen Fraktionen

#### Route 1: Autoshredderroute

Die Fraktionen aus dem vorigen Zerlegeschritt werden in der Autoshredder-Anlage nach verschiedenen Sortierprozessen in die Fraktionen Eisen, NE-Metalle, Shredderschwerfraktion und Shredderleichtfraktion sortiert. Anschließend erfolgt für die Shredderleichtfraktion sowie für die Shredderschwerfraktion eine Post-Shredder-Sortierung, um eine weitere Stofftrennung vorzunehmen. Auch die NE-Metall-Fraktion wird weiter nach den unterschiedlichen NE-Metallen aufgetrennt. Nach diesen Sortierschritten werden die einzelnen Massenmetalle als relativ reine Monofraktionen (Aluminium, Eisen/Stahl, Kupfer) gewonnen. Die Kunststoffanteile, v.a. aus den Platinen, werden ebenfalls abgetrennt und einer Müllverbrennungsanlage zugeführt. Die Edel- und Sondermetalle, die in den Platinen enthalten sind, (Gold, Silber, Palladium, Zinn, Tantal) gelangen über die verschiedenen Sortierschritte teilweise in die Kupferfraktion. Ein Großteil geht jedoch über die Kunststofffraktion und die Shreddersandfraktion für eine weitere Verwertung verloren, Palladium sogar vollständig. In der Ökobilanz werden der Energiebedarf (Strom, Diesel) der Shredder- und der Post-Shredder-Anlage sowie der Transport zwischen Shredder- und Post-Shredder-Anlage berücksichtigt.

#### Route 2a: Elektrorecyclingroute ohne chemische Platinenentstückung

Bei der Elektrorecyclingroute erzeugt die Prallmühle eine Platinenfraktion, die im nächsten Schritt einer Sortierung unterzogen wird. Über verschiedene mechanische Sortierschritte werden relative reine Monofraktionen für die Massenmetalle (Aluminium, Eisen/Stahl,



Kupfer) sowie eine Elektronikschrottfraction erzeugt. Die Edel- und Sondermetalle gelangen überwiegend in die Elektronikschrottfraction und teilweise in die Kupferfraction. In der Ökobilanz wird der Energiebedarf (Strom, Diesel) für den Betrieb der Sortieranlagen berücksichtigt.

#### Route 2b: Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinenentstückung

Zunächst erfolgt bei Route 2b die gleiche Sortierung wie bei Route 2a. Zusätzlich erfolgt jedoch noch eine weitere Aufbereitung der Platinenfraction mittels der chemischen Platinenentstückung. Hierbei werden die abgetrennten Platinen in eine wässrige Mischung aus Wasserstoffperoxid und Salzsäure verbracht, um das Lötzin auf den Platinen zu lösen. Anschließend werden die Bauteile von den Platinen abgetrennt und sortiert um bestimmte Bauteile (hier vor allem die Tantalkondensatoren) zu separieren. Die gelösten Metalle werden ausgefällt und abgetrennt, Kupfer mittels Zementation in elementarer Form und Zinn als Zinnsulfid. Das in den Kondensatoren enthaltene Tantal gelangt überwiegend in die Tantalkondensatorenfraction. Die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium sind überwiegend in den anderen abgelösten Bauteilen, sowie im Platinenrest. Die gewonnenen Fractionen gehen als Output in den nächsten Prozessschritt. Die Daten für den Prozess der chemischen Platinenentstückung wurden an der TU Clausthal in Laborexperimenten erhoben. Davon ausgehend werden in der Ökobilanz der Aufwand für die Chemikalien sowie der benötigte Strom berücksichtigt.

#### **Recycling der einzelnen Fractionen zur Rückgewinnung der Metalle**

Im letzten Prozessschritt werden die einzelnen Fractionen den jeweiligen Recyclern zugeführt. Eisen/Stahl kommt in das Elektrostahlwerk. Aluminium wird in der Sekundäraluminiumhütte zugeführt. Kupfer und in der Kupferfraction enthaltene Elektronikkomponenten werden in Sekundärkupferhütten wiederverwertet. Kunststofffractionen werden im MHKW energetisch verwertet. Der Aufwand des Recyclings wird für diese Prozesse mittels geeigneter Datenbankprozesse abgebildet.

Das Recycling der Platinenfractionen/des Elektroschrotts erfolgt in einem Elektroschrottofen, wie er beispielsweise von Umicore in Hoboken/Belgien betrieben wird. In der Modellierung wird davon ausgegangen, dass die Energieaufwendungen durch den Kunststoffanteil der Leiterplatten gedeckt werden [Grehl 2012]. Aus diesem Grund werden hier nur die entstehenden Emissionen auf Basis von Primärdaten für die Leiterplattenkunststoffe und deren Verbrennung bilanziert.

Die Aufbereitung der Tantalkondensatoren erfolgt über einen mechanischen Prozess, für den der elektrische Energiebedarf abgeschätzt wird.

Für die Verwertung des Zinnsulfids werden eine Röstung und eine anschließende Einspeisung des Zinnoxids in den Gewinnungsprozess der Zinnhütte angenommen.

Die Transporte von den Aufbereitungsanlagen zu den Metallverwertern werden in der Ökobilanz berücksichtigt.

## 4.2. Datengrundlage

### 4.2.1. Spezifische Daten

Eine wesentliche Festlegung bezüglich der verwendeten spezifischen Daten war die Einigung auf eine durchschnittliche Zusammensetzung der zu betrachtenden Leistungselektronik auf Basis der erhobenen Daten der TU Clausthal (siehe auch Kapitel 3.2.1, funktionelle Einheit). Die generische Zusammensetzung der Leistungselektronik wird als Eingangsstrom für die Bilanzierung des Recyclings über die drei Routen (Autorecyclingroute, Elektrorecyclingroute mit und ohne chemische Platinenentstückung) zugrunde gelegt. An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Zusammensetzungen der Leistungselektronik, die in den folgenden Tabellen aufgeführt sind, nicht die Zusammensetzung definierter Leistungselektroniken eines entsprechenden Herstellers wiedergeben. Die diversen unterschiedlichen Formen und Größen der real am Markt oder in Entwicklung befindlichen Leistungselektronik bestärkten das Projektteam in Abstimmung mit den Projektmitgliedern, vielmehr generische Durchschnittsdatensätze zu bilden.

Die Zusammensetzung auf Ebene der Bauteile und großen Metallbauteile der Leistungselektronik inklusive Gehäuse ist in Tabelle 4-1 dargestellt. Hierbei ist die Ebene der Bauteile bzw. der Stoffe aus den großen Bauteilen (Aluminiumgehäuse) dargestellt. Die übrigen Bauteile werden in weiteren Schritten dieses Kapitels näher erläutert.

**Tabelle 4-1: Durchschnittliche Zusammensetzung der Leistungselektronik**

Stoff/Bauteil	Anteil
Aluminium	56,1 %
Eisen	8,1 %
Kupfer inkl. Messing	8,7 %
Kunststoffe	5,8 %
Kondensatoren	13,9 %
Platinen	5,0 %
Kabel und Stecker	1,9 %
Sonstiges	0,5 %

Daten aus den Untersuchungen der TU Clausthal

Neben den aufgeführten Massenmetallen aus dem Gehäuse und den Anteilen in den jeweiligen Bauteilen sind vor allem die Edel- und Sondermetalle in den Platinen für die Ökobilanz relevant.



In Tabelle 4-2 sind die durchschnittlichen Edel- und Sondermetallgehalte der 16 untersuchten Platinen aufgeführt.

**Tabelle 4-2: Durchschnittlicher Metallgehalt der Platinen sowie Bandbreiten der Untersuchung**

<b>Metall</b>	<b>Durchschnittlicher Anteil</b>	<b>Bandbreite der Ergebnisse</b>
Kupfer	27,6 %	5,6 – 49,5 %
Zinn	2,2 %	1,3 – 3,8 %
Gold	0,018 %	0,0005 – 0,0458 %
Silber	0,063 %	0,0025 – 0,1235 %
Palladium	0,003 %	0,0005 – 0,0095 %
Tantal	0,024 %	0 – 0,1418 %
Niob	0,002 %	0 – 0,03 %
Antimon	0,057 %	0 – 0,4292 %

Daten aus den Untersuchungen der TU Clausthal

Die Kondensatoren bestehen aus Kupfer (rund 13 %), Aluminium (knapp 12 %) sowie Kunststoffen. Kabel und Stecker bestehen zu 40 % aus Kupfer und zu 60 % aus Kunststoff.

In Tabelle 4-3 ist die stoffliche Zusammensetzung der Leistungselektronik dargestellt, welche zur Untersuchung genutzt wurde.

**Tabelle 4-3: Durchschnittliche stoffliche Zusammensetzung der Leistungselektronik**

Stoff	Anteil
Aluminium	58,1 %
Eisen	8,9 %
Kupfer	12,3 %
Zinn	0,11 %
Gold	0,0009 %
Silber	0,0032 %
Palladium	0,00015 %
Tantal	0,0012 %
Niob	0,0001 %
Antimon	0,029 %
Kunststoff	18,6 %
Sonstiges	1,95 %

Daten aus den Untersuchungen der TU Clausthal

Bei den Kunststoffen handelt es sich um Polyethylenfolien im Kondensator, Epoxidharz in den Platinen, Epoxid-Klebstoffe, verschiedene Polyamide und thermoplastische Urethane. Unter „Sonstiges“ fallen Stoffe, welche während des Recyclings verloren gehen und deshalb keine Rolle spielen, wie beispielsweise Glasfasern in den Platinen, Silikondichtungsmasse, Kleber, Dichtungen.

Die prozessspezifischen Daten für die bilanzierten Prozessschritte wurden von den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Tabelle 4-4 zeigt die Datenherkunft im Überblick.

**Tabelle 4-4: Herkunft der prozessspezifischen Daten**

Prozessschritt	Datenquelle	Maßstab des Prozesses
Ausbau und Zerlegung der Leistungselektronik	Volkswagen	Praxisprozesse
	Electrocyling	Praxisprozesse
Separation und Aufbereitung der einzelnen Fraktionen	Electrocyling	Praxisprozesse
	TU Clausthal	Labormaßstab für Platinentstückung
Recycling der einzelnen Fraktionen zur Rückgewinnung der Metalle	Electrocyling	Praxisprozesse
	TU Clausthal	Labormaßstab für Tantalkondensator- und Zinnsulfidrecycling

Neben den prozessspezifischen Daten sind die Metallverluste entlang der Verwertungskette für das Recycling wichtig. Diese bestimmen, wieviel der in der Leistungselektronik vorhandenen Metalle tatsächlich in den Kreislauf zurückgeführt werden können. Die Verluste fallen in der Aufbereitung und in der Verhüttung an. Sie sind technologiebedingt für jede Route unterschiedlich. Für alle drei Routen wurde von einer Anwendung des heutigen Stands der Technik ausgegangen. Da es insbesondere zu den Aufbereitungsverlusten keine Literaturdaten gibt, wurden Expertenschätzungen für die Höhe der Verluste in der Aufbereitung vorgenommen. Diese Abschätzungen beziehen sich auf die spezifischen Komponenten der Leistungselektronik und sind nicht auf das Gesamtfahrzeug übertragbar.

Die angenommenen Verluste sind in Tabelle 4-5 dargestellt.

**Tabelle 4-5: Angenommene Metallverluste in Verhüttung und Aufbereitung bei Anwendung des heutigen Stands der Technik (Abschätzung für Leistungselektronik; nicht übertragbar auf das Gesamtfahrzeug)**

Metall	1.	2a.	2b.
	Autoshredder- route	Elektro- recyclingroute	Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinenentstückung
Aluminium	8 %	8 %	8 %
Eisen	11 %	11 %	11 %
Kupfer	12 %	7 %	7 %
Zinn	84 %	36 %	7 %
Gold	81 %	7 %	7 %
Silber	81 %	7 %	7 %
Palladium	100 %	13 %	13 %
Tantal	100 %	100 %	14 %

Die Unterschiede in den Rückgewinnungsquoten der Massenmetalle resultieren vorrangig aus unterschiedlichen Verlusten in der Metallhütte. Bei Stahl in der Elektroofenroute beträgt der Verlust 8 % [Neugebauer 2012]. Bei Aluminium, Kupfer sowie den Edelmetallen wird durch Abschätzungen auf Basis von Materialflussanalysen von einem Verlust von 5 % in der Metallhütte ausgegangen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass in der Autoshredderroute kleinere Kupferanteile aufgrund von Anhaftungen an Leiterplatten und Kunststoffen nicht rückgewonnen werden.

#### 4.2.2. Generische Datensätze

Eine Übersicht über die verwendeten generischen Datensätze gibt Annex 1.

Zur Modellierung wurde als Bilanzierungswerkzeug die Bilanzierungssoftware „GaBi“ eingesetzt. Diese Vorgehensweise hat aus pragmatischen Gründen zu folgender Auswahl der Literaturdatensätze geführt:

Für die gesamte Modellierung werden Datensätze aus ecoinvent 3.1 verwendet. Lediglich zur Modellierung der Vorkette für die Produktion von Primärzinn und –tantal wurden Modellierungen auf Basis ecoinvent v2.1 report No. 10 (Life Cycle Inventories of Metals) vorgenommen. Diese Modellierungen waren notwendig, da die Erzgewinnung in der Zinn-

und Tantalprozesskette nicht separat vorhanden ist und so eine Abtrennung nicht möglich ist. Die Erzgewinnung für beide Metalle wurde aus diesem Grund mit Prozessen aus ecoinvent 3.1 auf Basis der Primärdaten im oben erwähnten Report 10 modelliert.

Der geographische Bezug der Datensätze wird nach Möglichkeit landesspezifisch (Deutschland), sonst europäisch oder global (in dieser Priorisierung) gewählt.

Für den Transport zwischen den einzelnen Behandlungsstätten, z.B. zwischen Autoshreder und Post-Shredder-Anlage, wird ein LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) von größer 32 t angenommen. Alle LKW werden als dieselbetrieben, EURO 6 angenommen, mit Ausnahme der Modellierungen für den Bergbau von Tantal, bei dem von EURO 3 ausgegangen wird. Weitere Ausführungen zur Modellierung der Transporte können Kapitel 4.2.3 entnommen werden.

Für die Energieversorgung sowie Gutschriften auf Energiebasis (Strom, Prozesswärme, Diesel) werden die gleichen Prozesse verwendet. Für Gutschrift der Wärme wird die Verteilung aus [AG Fernwärme 2014] verwendet (40,3 % Wärme aus Erdgas, 59,7 % aus anderen Quellen).

#### **4.2.3. Modellierung der Transporte**

Für alle Güterbewegungen (mit Ausnahme der Modellierung des Tantalbergbaus) wird ausschließlich der Transport per LKW (dieselbetrieben, EURO 6) angesetzt, wofür Datensätze aus ecoinvent v3.1 verwendet werden. Die wesentlichen Annahmen zur Auslastung (leere Rückfahrt) sind im betreffenden Datensatz enthalten und werden unverändert übernommen.

Für die Transportentfernungen werden folgende Annahmen getroffen:

- Route 1: Autoshreder – Post-Shredder: 350 km
- Route 1: Post-Shredder – Metallverhüttung: 350 km
- Routen 2a/2b: Altautoverwerter (Demontage der Leistungselektronik) – Elektronikschrottreycler: 350 km
- Routen 2a/2b: Elektronikschrottreycler – Metallverhüttung 350 km

Die Gutschriften erfolgen ab Werk, das heißt, dass in den Gutschriften keine Transporte von der Produktionsstätte zum Verbraucher enthalten sind.

#### **4.2.4. Modellierung der Gutschriften**

Für das Gesamtergebnis der Ökobilanz ist die Bewertung des Materialrecyclings entscheidend. Daher kommt der Modellierung der Gutschriften aus dem Recycling eine sehr hohe Bedeutung zu. Dies betrifft sowohl die ingenieurmäßige Entscheidung der „Äquivalenz“ von Rezyklat und Primärmaterial als auch die Auswahl der entsprechenden Ökobilanzprozesse aus den Ökobilanzierungsdatenbanken.

Das Recycling der Leistungselektronik findet in den drei beschriebenen Schritten statt, an dessen Ende stets die Materialrecycler stehen. Dort verlassen die aufbereiteten



Sekundärmaterialien das System und es wird eine Gutschrift vergeben. In der vorliegenden Ökobilanz wird davon ausgegangen, dass die erzeugten Sekundärmetalle in ihren Eigenschaften den Primärmaterialien entsprechen. Für die thermische Verwertung werden die Energieträger (Strom, Wärme) gutgeschrieben.

Das Aluminiumgehäuse sowie weitere Aluminiumteile werden über den in ecoinvent vorhandenen Einschmelzprozess recycelt.

Die Stahlbauteile können als hochwertiger Schrott eingestuft werden. Der in ecoinvent vorhandene Elektrostahlprozess wurde verwendet.

Kupfer fällt durch die Platine und die Kabel an. Zusammen mit den übrigen auf der Platine vorhandenen Edelmetallen (**Gold, Silber, Palladium**) sowie **Zinn** werden diese über eine Modellierung des Umicore Elektroschrottrecyclings abgebildet. Im Falle der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung wird das anfallende Zinnsulfid einer Röstung unterzogen und dem Prozess der Primärgewinnung unterworfen. Hierbei wird der Anteil der Erzgewinnung modelliert und vom Gesamtprozess der Primärgewinnung abgezogen, um nur den Teil der Raffination abzubilden.

Die mechanische Aufbereitung von **Tantal** in der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung basiert auf Labordaten der TU Clausthal. Hierbei werden die Tantalkondensatoren aufgemahlen und das Tantalpulver durch Siebung aufgereinigt. Das so erzeugte Tantalkonzentrat wird in die Primärgewinnung eingespeist. Wie beim Zinn wird hier der Anteil der Erzgewinnung modelliert und vom Gesamtprozess der Primärgewinnung abgezogen, um nur den Teil der Raffination abzubilden.

Kunststoffe werden nicht stofflich, sondern thermisch in einem MHKW verwertet. Dies geschieht über den in ecoinvent vorhandenen Prozess der Kunststoffverbrennung. Die Heizwerte der Kunststoffe aus der Leistungselektronik und der Angaben im ecoinvent-Prozess wurden verglichen und bedürfen keiner Anpassung. Die dort genannten Werte zur Strom- und Wärmebereitstellung werden für die Gutschriften genutzt. Für die Wärme wird der Mix der [AG Fernwärme 2014] genutzt, um die Anteile an Gas und sonstigen Energieträgern zur Wärmebereitstellung abzubilden.

In der vorliegenden Tabelle werden die rezyklierten Materialien (Materialien), der Recyclingprozess (Recyclingprozess) und der zur Gutschrift herangezogene Primärprozess (Primärprozess) im Überblick dargestellt. In einer zusätzlichen Spalte (Bemerkung) wird vermerkt, ob der angeführte Prozess aus der Ökobilanzierungsdatenbank unverändert (ohne Zusatz) oder adaptiert worden ist.

Die eingesetzten Prozesse aus der Ökobilanzierungsdatenbank sind im Annex 1 dokumentiert.

**Tabelle 4-6: Gegenüberstellung der rezyklierten Materialien, des angelasteten Recyclingprozesses sowie der für das Recyclingmaterial erteilten Gutschrift**

Materialien	Recyclingprozess	Gutschrift	Bemerkung
Aluminium	Sekundäraluminium (Aufarbeitung und Umschmelzen)	Primäraluminium	
Stahl	Elektrostahl	Primärstahl, niedriglegiert	
Kupfer	Modellierung Umicoreprozess	Primärkupfer	Modellierung erfolgt auf Basis der Angaben von Umicore
Gold	Modellierung Umicoreprozess	Primärgold	Modellierung erfolgt auf Basis der Angaben von Umicore
Silber	Modellierung Umicoreprozess	Primärsilber	Modellierung erfolgt auf Basis der Angaben von Umicore
Zinn	Modellierung Umicoreprozess  Primärdaten des Projektes für SnS	Primärzinn	Sekundärzinnerzeugung: Prozess der Erzgewinnung modelliert und vom ecoinvent-Prozess abgezogen, Röstung hinzugefügt
Palladium	Modellierung Umicoreprozess	Primärpalladium	Modellierung erfolgt auf Basis der Angaben von Umicore
Tantal	Primärdaten des Projektes	Primärtantal	Sekundärtantalerzeugung: Prozess der Erzgewinnung modelliert und vom ecoinvent-Prozess abgezogen, mechanische Aufbereitung hinzugefügt
Kunststoff	Thermische Verwertung in einem MHKW aus ecoinvent	Strom  Wärme	Modellierung der thermischen Verwertung der Kunststoffteile des Leistungselektronik (v.a. des großen Kondensators) im MHKW mit Vergabe von Gutschriften für erzeugten Strom und Wärme. Für die erzeugte Wärme wird der Mix der [AG Fernwärme 2014] gutgeschrieben.

### 4.3. Einschätzung der Datenqualität

Die Datenqualität kann aufgrund der Datenherkunft näher diskutiert werden. Dazu können die eingesetzten Daten klassifiziert werden:

- § Sekundärdaten aus validierten Datenbanken (Strom, Hilfsstoffe, Metalle etc.),
- § Primärdaten von Projektteilnehmern auf Basis von etablierten Prozessen,
- § Primärdaten von Projektteilnehmern auf Basis von eigenen Untersuchungen anhand von Labordaten.

Die Datenqualität von Sekundärdaten ist im Allgemeinen angemessen, wenngleich für Buntmetalle hier Einschränkungen vorliegen. Die Abdeckung der weltweiten Produktion ist nicht vollständig und Emissionen, insbesondere von Luftschadstoffen, können lokal deutliche Unterschiede aufweisen.

Primärdaten auf Basis von etablierten Prozessen sind im Allgemeinen als gut zu bezeichnen.

Die Primärdaten auf Basis von Labordaten wurden direkt hochgerechnet, da Skalierungsversuche keine Einsparungen an Chemikalien gezeigt haben. Die Labordaten können somit als verlässlich hinsichtlich der Größenordnung eingestuft werden.

## 5. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse werden nach den vorherigen beschriebenen Routen geordnet. Die berücksichtigten Wirkungskategorien umfassen: GWP, AP, EP, POCP, ADP<sub>elementar</sub>, ADP<sub>fossil</sub>.

Die Ergebnisse der gesamten Recyclingroute werden zunächst vollständig dargestellt. Es folgt eine Aufschlüsselung nach den einzelnen zur Umweltlast beitragenden Prozessen sowie eine graphische Aufstellung der Gutschriftenbeiträge.

Bei den Lasten erfolgt eine Aufschlüsselung nach den Prozessen Strombereitstellung, Treibstoffnutzung, Transport, Kunststoffverbrennung im MHKW, direkten Prozessemissionen der einzelnen Routenschritte, der Platinenentstückung sowie den Beiträgen der Recyclingprozesse für Stahl, Aluminium, Tantal und Zinn. Die Treibstoffnutzung bezieht sich, im Gegensatz zu den Transporten, auf den verwendeten Treibstoff, welcher für Radlader, Gabelstapler und dieselbetriebene Maschinen am Behandlungsort verwendet wird.

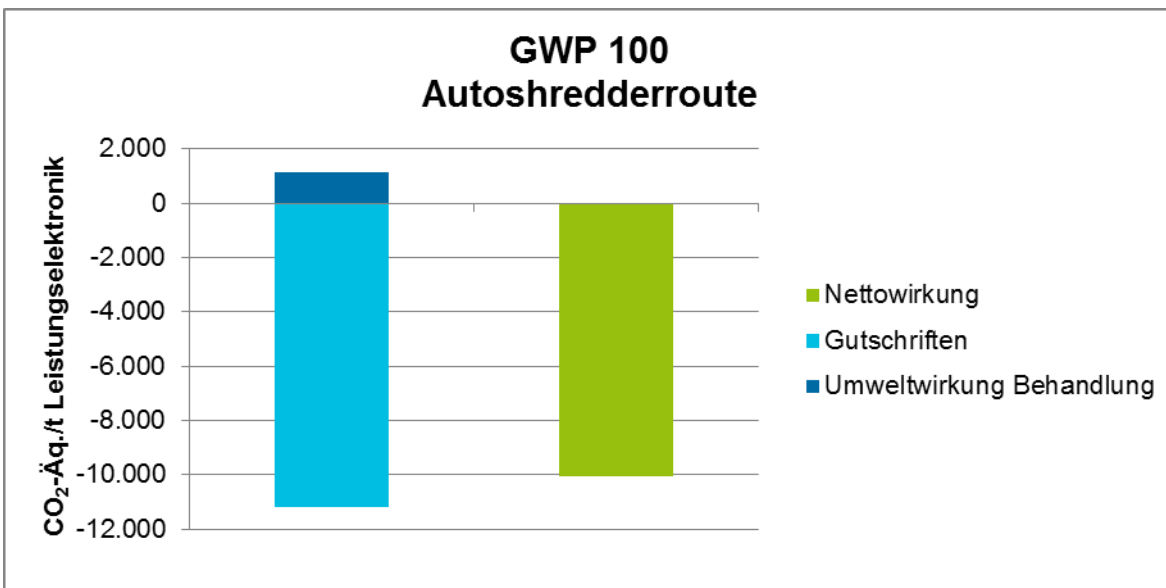
Bei den Gutschriften erfolgt die Aufschlüsselung nach den Metallen Aluminium, Gold, Silber, Zinn, Kupfer, Stahl, Palladium, Tantal sowie nach dem bereitgestellten Strom und der Wärme aus der thermischen Kunststoffverwertung.

## 5.1. Route 1: Autoshredderroute

### 5.1.1. Klimaerwärmungspotenzial (GWP)

Abbildung 5-1 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Autoshredderroute für die Kategorie Klimaerwärmungspotenzial dargestellt.

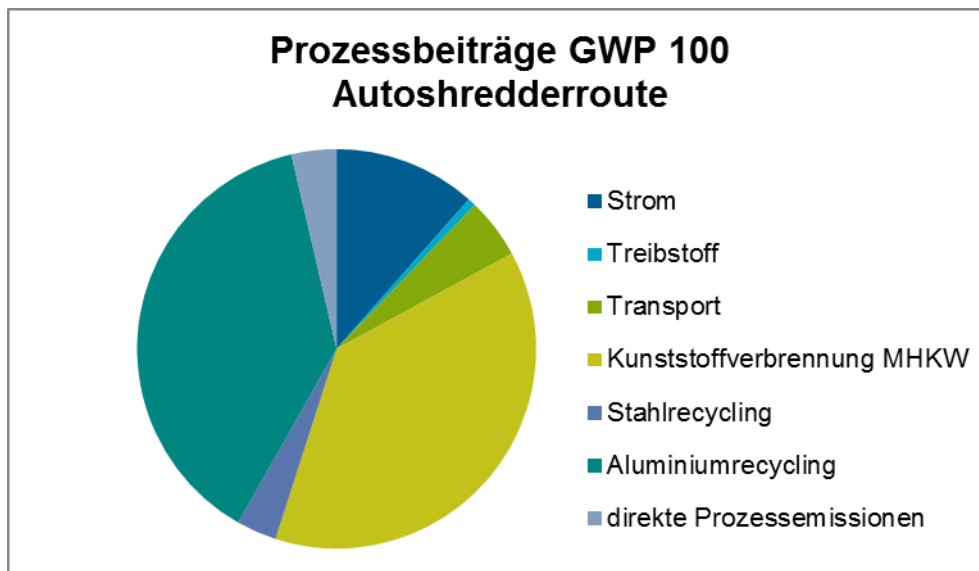
Abbildung 5-1: GWP: Gesamtwirkung Autoshredderroute



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Autoshredderroute verursacht Emissionen in Höhe von 1,15 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 11,2 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente ein.

Abbildung 5-2 zeigt die Umweltwirkungen für die Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie Klimaerwärmungspotenzial der Autoshredderroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

**Abbildung 5-2: GWP: Anteile der Prozesse der Autoshredderroute an den Gesamtaufwendungen**



Die Hauptbeiträge zum Klimaerwärmungspotenzial kommen von den Emissionen der Kunststoffverbrennung (38 %) und dem Aluminiumrecycling (38 %), welches für den Schmelzvorgang sehr viel Energie benötigt und zudem den größten Massenanteil der Leistungselektronik verwertet. Der Strombedarf für den Betrieb des Shredders und der Post-Shredder-Anlage macht 12 % aus. Die übrigen 12 % teilen sich auf Transport, direkte Prozessemissionen aus der Edelmetallverwertung, Stahlrecycling und den Treibstoff für Radlader/Gabelstapler auf. CO<sub>2</sub> liefert mit gut 97 % den höchsten Beitrag von allen Emissionen in dieser Kategorie.

Abbildung 5-3 zeigt die Gutschriften für die Kategorie Klimaerwärmungspotenzial der Autoshredderroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-3: GWP: Gutschriftenanteile für die Autoshredderroute**

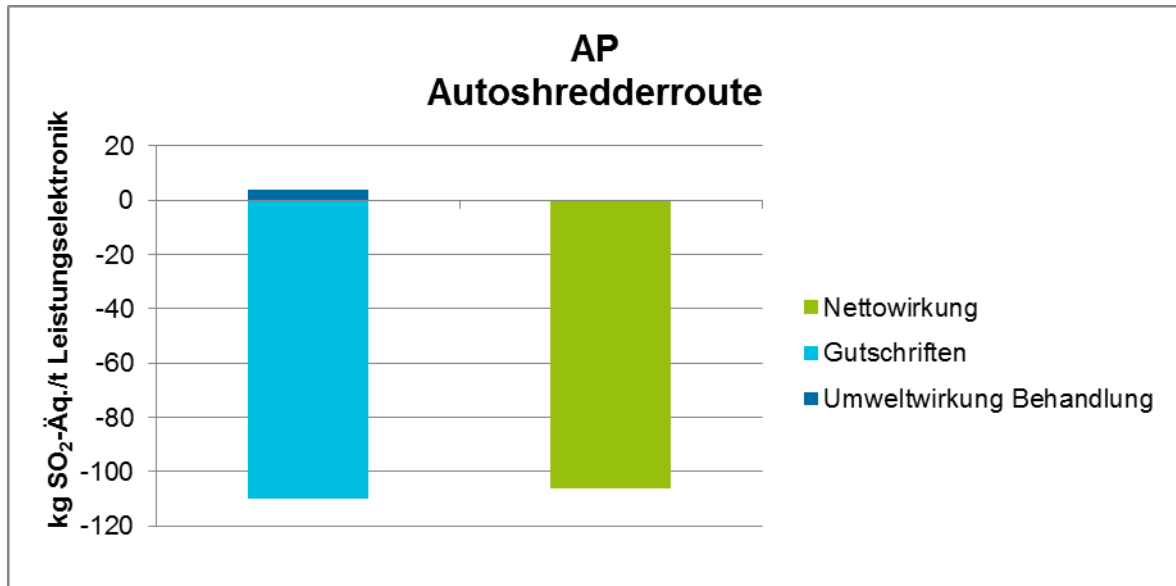


Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie Klimaerwärmungspotenzial stammt vom Aluminium (94 %). Dies liegt an der eingesparten Energie, welche für die Primäraluminiumherstellung benötigt wird. Die übrigen 6 % werden vor allem von den Gutschriften für Kupfer und Stahl sowie für bereitgestellte Wärme und Strom ausgefüllt. Die übrigen Metalle spielen keine Rolle in dieser Kategorie. CO<sub>2</sub> liefert mit gut 88 % den höchsten Beitrag von allen Emissionen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

### 5.1.2. Versauerungspotenzial (AP)

Abbildung 5-4 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Autoschredderroute für die Kategorie Versauerungspotenzial dargestellt.

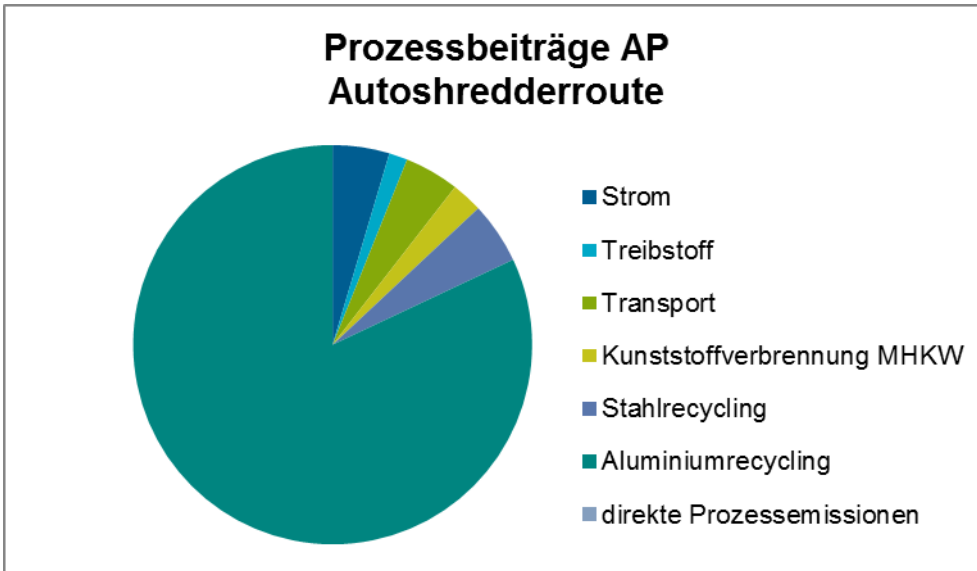
Abbildung 5-4: AP: Gesamtwirkung Autoschredderroute



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Autoschredderroute verursacht Emissionen in Höhe von 3,84 kg SO<sub>2</sub>-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 110 kg SO<sub>2</sub>-Äquivalente ein.

Abbildung 5-5 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen in der gesamten Recyclingkette für die Kategorie Versauerungspotenzial der Autoshredderroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

**Abbildung 5-5: AP: Anteile der Prozesse der Autoshredderroute an den Gesamtaufwendungen**

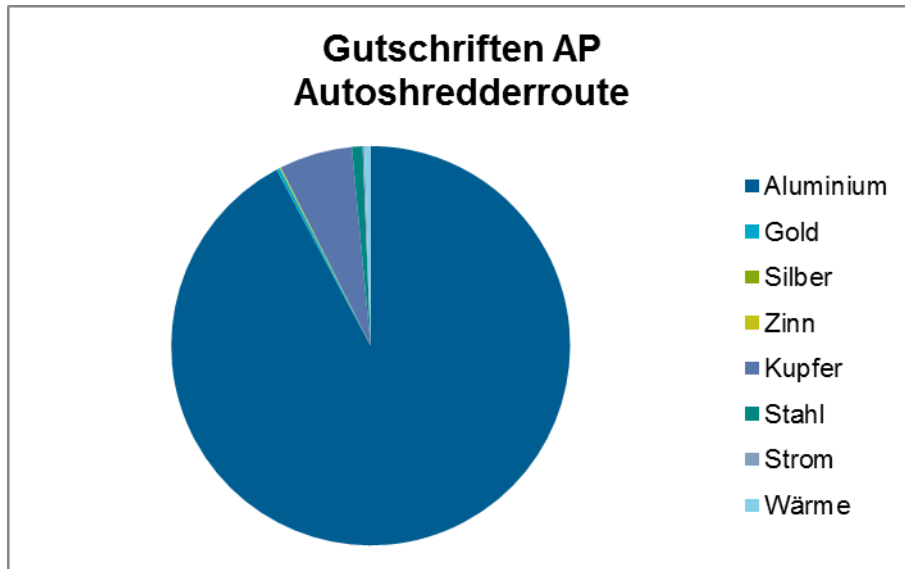


Der Hauptbeitrag zum Versauerungspotenzial stammt vom Aluminiumrecycling (82 %), welches durch seinen Stromverbrauch, und die Bereitstellung von Metallen für den Schmelzprozess saure Emissionen verursacht. Die übrigen 18 % teilen sich in absteigender Reihenfolge unter dem Strombedarf (5 %), dem Stahlrecycling (5 %), dem Transport (4 %), der Kunststoffverbrennung (3 %) und dem Treibstoffbedarf (1 %) auf. SO<sub>2</sub> liefert mit gut 73 % den höchsten Beitrag, NO<sub>x</sub> mit knapp 22 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen in dieser Kategorie.



Abbildung 5-6 zeigt die Gutschriften für die Kategorie Versauerungspotenzial der Autoshredderroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-6: AP: Gutschriftenanteile für die Autoshredderroute**

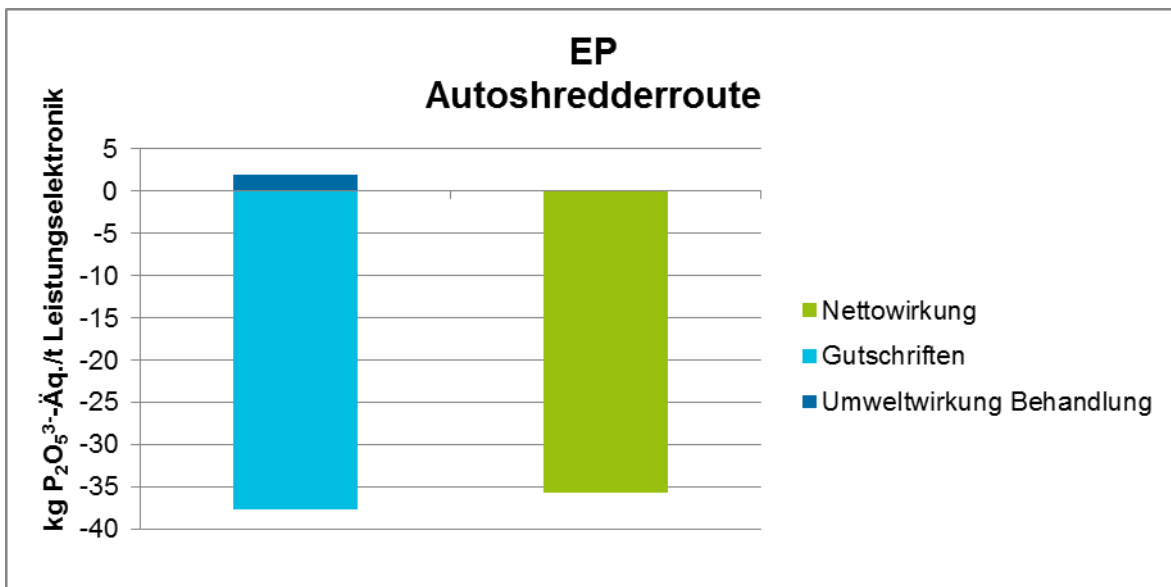


Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie Versauerungspotenzial stammt vom Aluminium (92 %). Dieser Beitrag ist vor allem dem Energiebedarf der vermiedenen Primäraluminiumherstellung und den damit verbundenen sauren Emissionen zuzuschreiben. Einen weiteren Beitrag liefert das recycelte Kupfer mit 6 %. Die verbliebenen 2 % teilen sich auf die übrigen Metalle sowie Strom und Wärme auf. SO<sub>2</sub> liefert mit gut 80 % den höchsten Beitrag, NO<sub>x</sub> mit gut 15 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

### 5.1.3. Eutrophierungspotenzial (EP)

Abbildung 5-7 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Autosshredderroute für die Kategorie Eutrophierungspotenzial dargestellt.

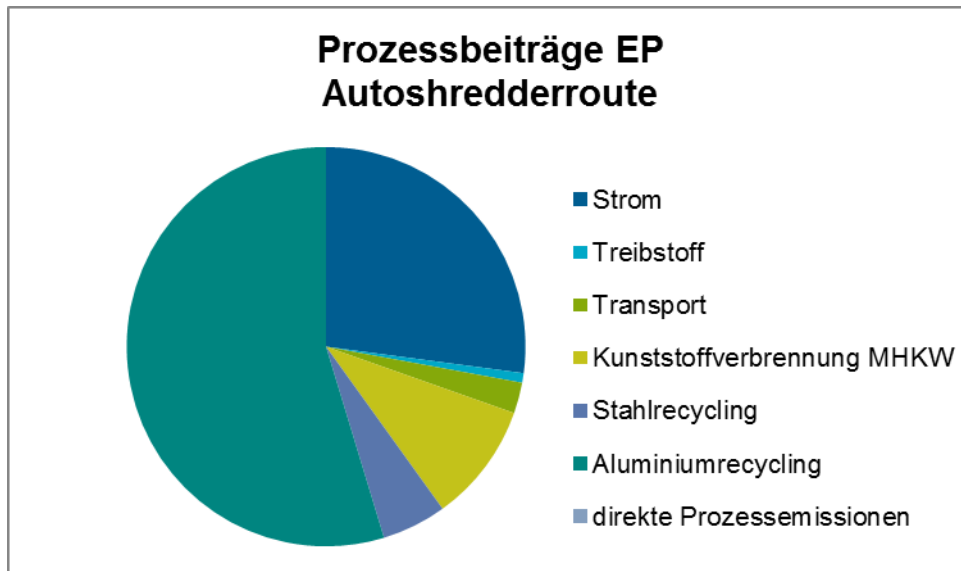
Abbildung 5-7: EP: Gesamtwirkung Autosshredderroute



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Autosshredderroute verursacht Emissionen in Höhe von 1,91 kg Phosphat-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 37,6 kg Phosphat-Äquivalente ein.

Abbildung 5-8 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie Eutrophierungspotenzial der Autoshredderroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

**Abbildung 5-8: EP: Anteile der Prozesse der Autoshredderroute an den Gesamtaufwendungen**

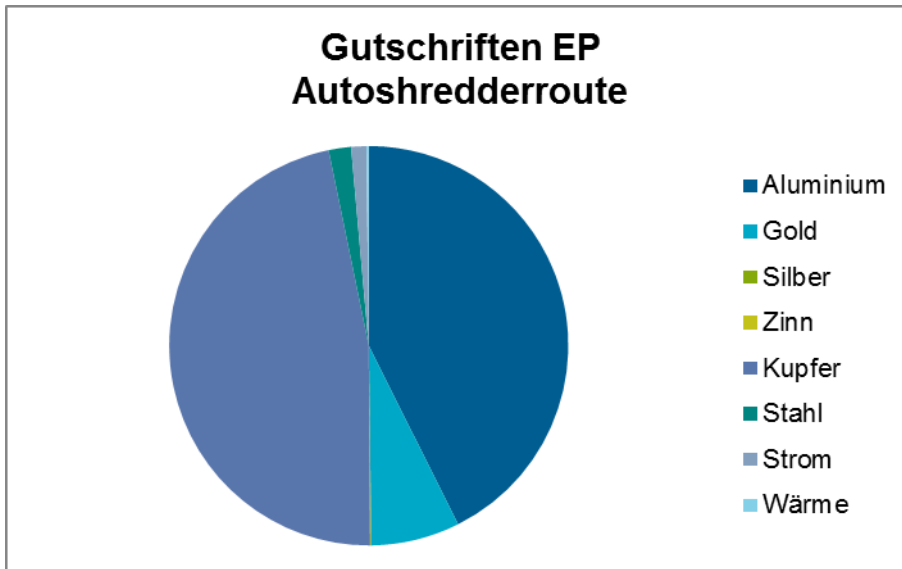


Die Hauptbeiträge für die Aufwendungen in der Kategorie Eutrophierungspotenzial stammen vom Aluminiumrecycling (55 %) und vom Strombedarf (27 %). Hier sind die Strombereitstellung und die notwendigen Metalle für das Aluminiumrecycling die größten Emittenten. Die thermische Kunststoffverwertung hat mit 10 % ebenfalls noch einen größeren Anteil. Die übrigen 8 % teilen sich in absteigender Reihenfolge unter dem Stahlrecycling, dem Transport und dem Treibstoffbedarf auf. Phosphat liefert mit rund 65 % den höchsten Beitrag, NO<sub>x</sub> mit gut 11 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen in dieser Kategorie.

Die beiden größten Gutschriftenbeiträge der Kategorie Eutrophierungspotenzial stammen von Kupfer (47 %) und Aluminium (43 %). Der Beitrag des Kupfers stammt vor allem von den Phosphatmissionen aus den Rückstandsschlämmen (Tailings), der des Aluminiums aus dem hohen Strombedarf der Schmelzflusselektrolyse. Trotz des geringen Massenanteils leistet Gold einen Beitrag von 7 %. Die übrigen 3 % verteilen sich zu fast gleichen Teilen auf Stahl und Strom, während die übrigen Gutschriften vernachlässigbar sind. Phosphat liefert mit rund 55 % den höchsten Beitrag, NO<sub>x</sub> mit knapp 12 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

Abbildung 5-9 zeigt die Gutschriften für die Kategorie Eutrophierungspotenzial der Autoschredderroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

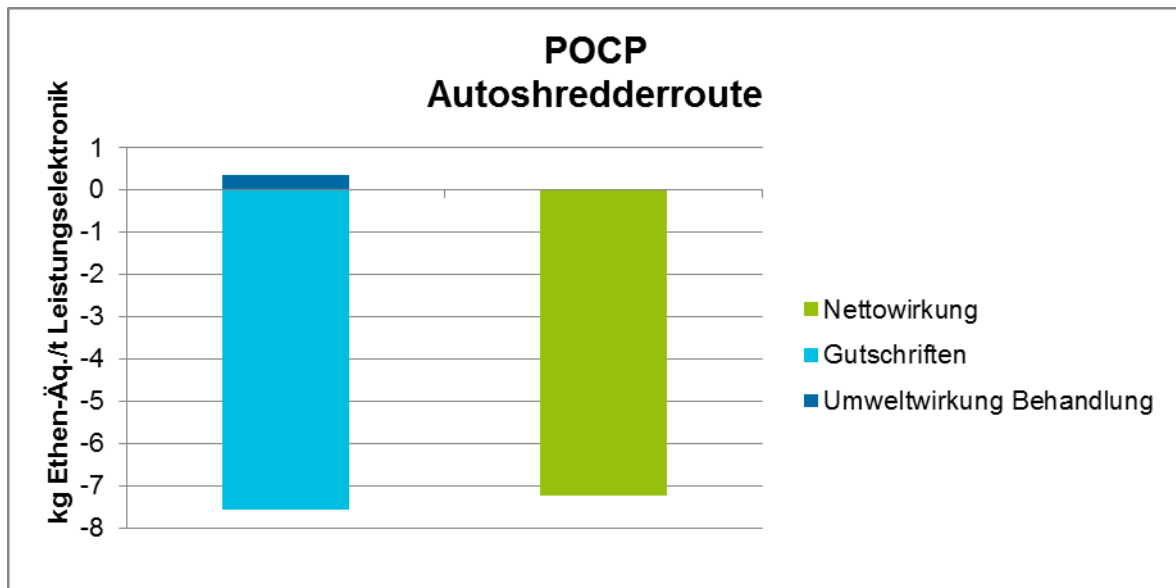
**Abbildung 5-9: EP: Gutschriftenanteile für die Autoschredderroute**



### 5.1.4. Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)

Abbildung 5-10 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Autosshredderroute für die Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial dargestellt.

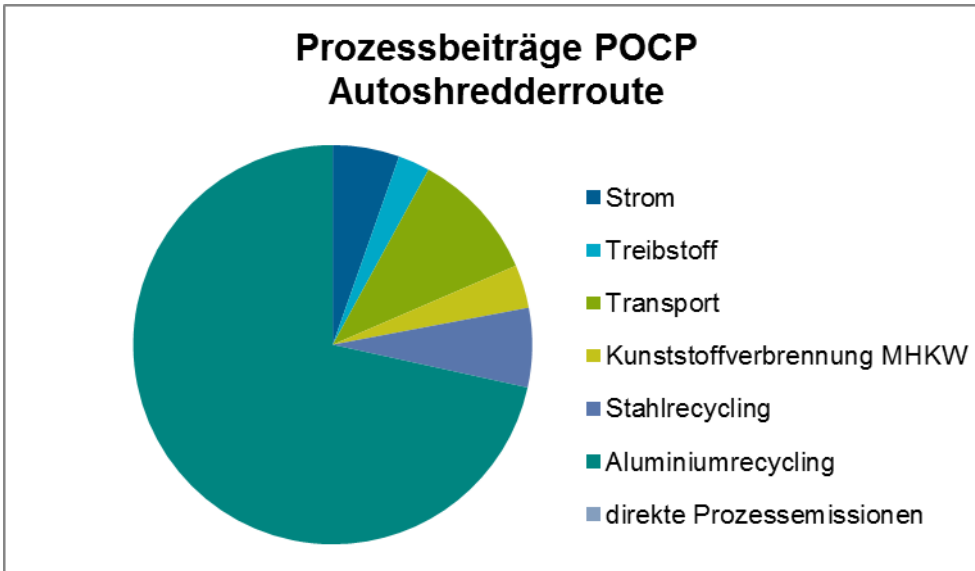
Abbildung 5-10: POCP: Gesamtwirkung Autosshredderroute



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Autosshredderroute verursacht Emissionen in Höhe von 0,34 kg Ethen-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 7,56 kg Ethen-Äquivalente ein.

Abbildung 5-11 zeigt die Umweltwirkungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial der Autoshrredderroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

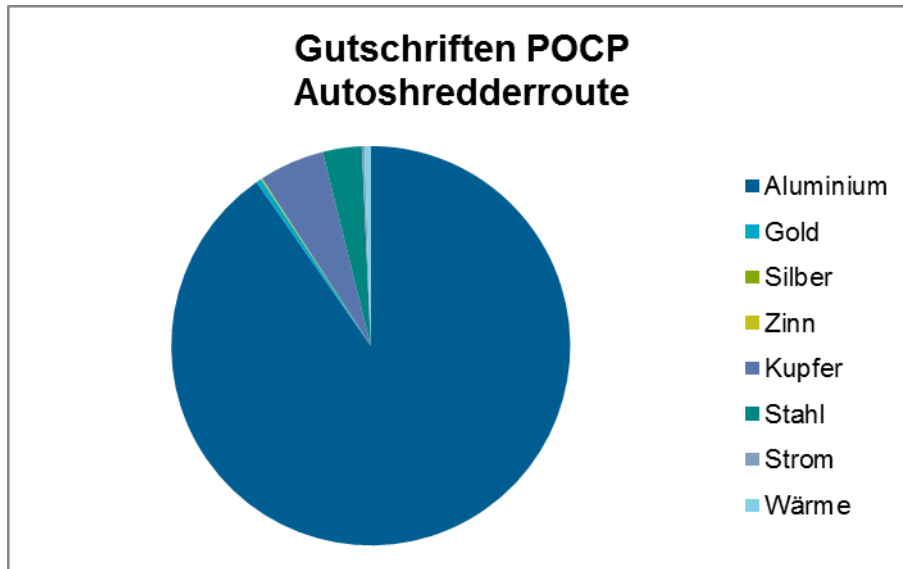
**Abbildung 5-11: POCP: Anteile der Prozesse der Autoshrredderroute an den Gesamtaufwendungen**



Der Hauptbeitrag für die Aufwendungen in der Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial stammt vom Aluminiumrecycling (72 %). Hier entstammen die relevanten Emissionen vor allem aus der Bereitstellung der Metalle, welche für das Aluminiumrecycling benötigt werden. Der Transport trägt durch seine Kohlenwasserstoffemissionen 11 % bei. Der Strombedarf sowie das Stahlrecycling tragen jeweils 6 % bzw. 5 % bei. Die übrigen 6 % teilen sich in absteigender Reihenfolge unter dem thermischen Kunststoffrecycling und dem Treibstoffbedarf auf. Die Gruppe der NMVOC liefert mit knapp 41 % den höchsten Beitrag, SO<sub>2</sub> mit gut 33 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen in dieser Kategorie.

Abbildung 5-12 zeigt die Gutschriften für die Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial der Autoschredderroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-12: POCP: Gutschriftenanteile für die Autoschredderroute**

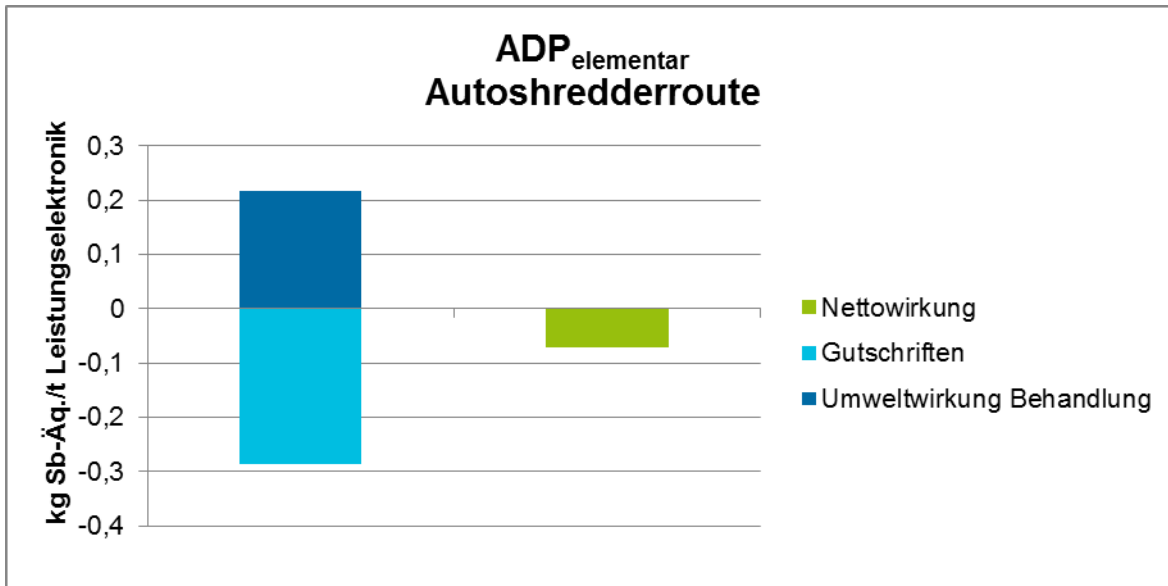


Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial stammt vom Aluminium (90 %). Dieser Beitrag kommt vor allem vom hohen Strombedarf der Schmelzflusselektrolyse. Kupfer trägt mit 5 % und Stahl mit 3 % zu den Gutschriften bei. Die verbliebenen 2 % verteilen auf die übrigen Metalle sowie Strom und Wärme. SO<sub>2</sub> liefert mit gut 46 % den höchsten Beitrag, CO mit gut 21 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

**5.1.5. Elementarer Ressourcenverbrauch ( $ADP_{\text{elementar}}$ )**

Abbildung 5-13 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Autoschredderroute für die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch dargestellt.

**Abbildung 5-13:  $ADP_{\text{elementar}}$ : Gesamtwirkung Autoschredderroute**

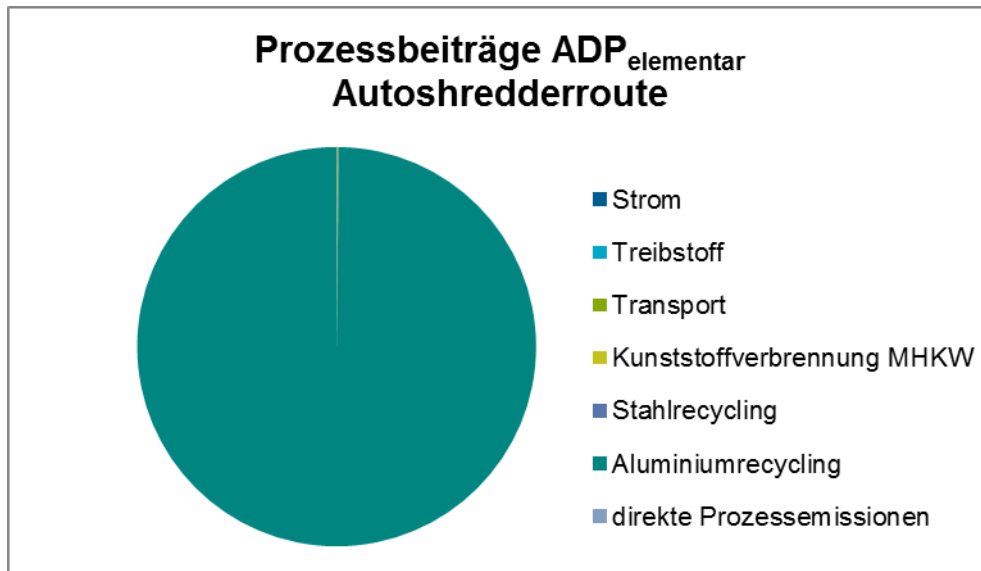


Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Autoschredderroute verursacht Emissionen in Höhe von 0,22 kg Sb-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 0,29 kg Sb-Äquivalente ein. Die Nettowirkung ist nur leicht positiv, obwohl der betrachtete Prozess auf das Recycling fokussiert. Dies ist erklärbar über den hohen Beitrag zum  $ADP_{\text{elementar}}$  durch verwendete Zusatzstoffe in der Aluminiumsekundärmetallhütte (siehe Erläuterungen zu Grafik Abbildung 5-5 im nächsten Absatz), dem in dieser Kategorie trotz des Aluminiumrecyclings keine gleichwertigen Gutschriften gegenüberstehen. Aluminium ist das häufigste Metall in der Erdkruste, weshalb seine Rückgewinnung in dieser Wirkungskategorie trotz der hohen Menge keine signifikanten Auswirkungen zeigt.



Abbildung 5-14 zeigt die Umweltwirkungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch der Autoshredderroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

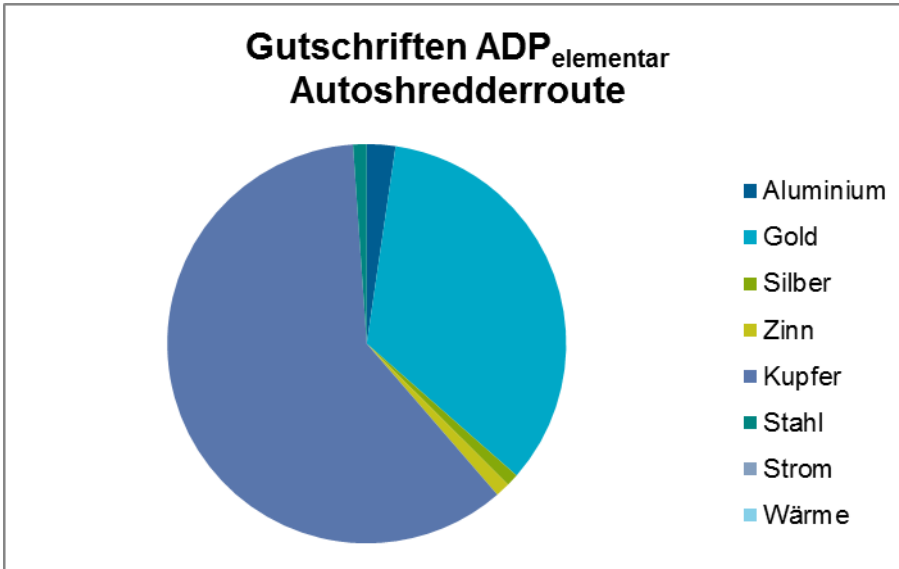
**Abbildung 5-14: ADP<sub>elementar</sub>: Anteile der Prozesse der Autoshredderroute an den Gesamtaufwendungen**



Der Hauptbeitrag für die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch mit fast 100 % stammt vom Aluminiumrecycling. Hier entstammt der Hauptteil vor allem aus der Bereitstellung von Ressourcen, welche für die vermiedene Primäraluminiumproduktion benötigt werden. Blei liefert mit knapp 50 % den höchsten Beitrag, Cadmium mit gut 34 % den zweithöchsten Beitrag von allen Ressourcen in dieser Kategorie. Diese beiden Metalle werden für die Bereitstellung des, für das Aluminiumrecycling notwendige, Zinks verbraucht und sind in dieser Wirkungskategorie im Vergleich zum Aluminium mit einem hohen Charakterisierungsfaktor belegt.

Abbildung 5-15 zeigt die Gutschriften für die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch der Autoschredderroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-15: ADP<sub>elementar</sub>: Gutschriftenanteile für die Autoschredderroute**

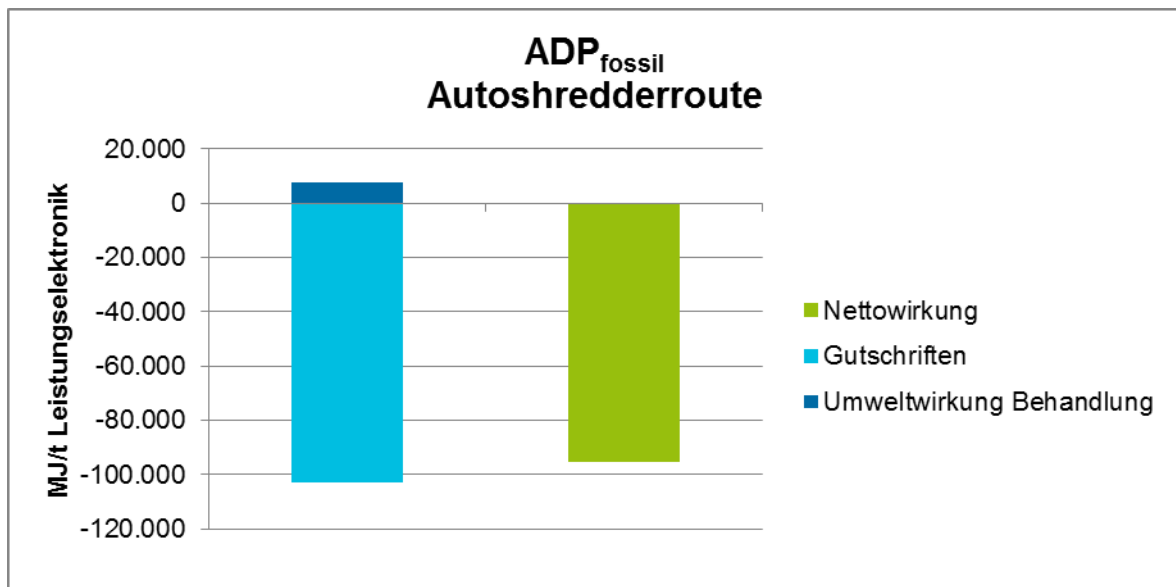


Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch stammt vom Kupfer (60 %) aufgrund des hohen Massenanteils in der Leistungselektronik gepaart mit der wesentlich geringeren Reservenmenge ( $1 \cdot 10^{-3}$  Sb-Äq./kg im Gegensatz zu  $1 \cdot 10^{-9}$  Sb-Äq./kg bei Aluminium). Bemerkenswert ist, dass Gold trotz seiner geringen Menge 34 % zu den Gutschriften beiträgt, was mit der Reservenmenge zu erklären ist ( $52$  Sb-Äq./kg). Die übrigen 6 % verteilen sich auf Aluminium, Zinn, Stahl und Silber. Kupfer liefert mit knapp 45 % den höchsten Beitrag, Gold mit knapp 34 % den zweithöchsten Beitrag von allen Ressourcen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

### 5.1.6. Fossiler Ressourcenverbrauch ( $ADP_{fossil}$ )

Abbildung 5-16 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Autoschredderroute für die Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch dargestellt.

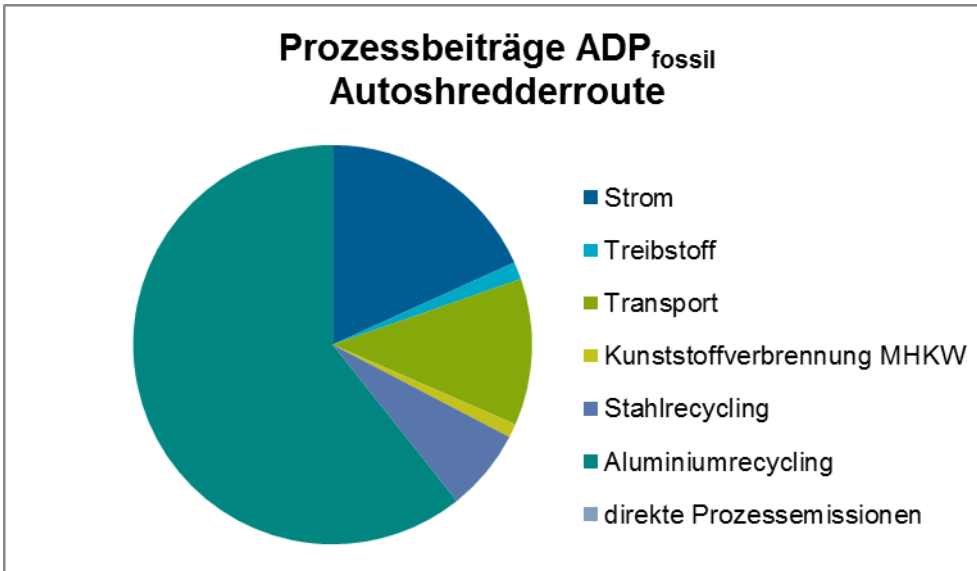
**Abbildung 5-16:  $ADP_{fossil}$ : Gesamtwirkung Autoschredderroute**



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Autoschredderroute verursacht Emissionen in Höhe von 7.730 MJ, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 103.000 MJ ein.

Abbildung 5-17 zeigt die Umweltwirkungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch der Autoshredderroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

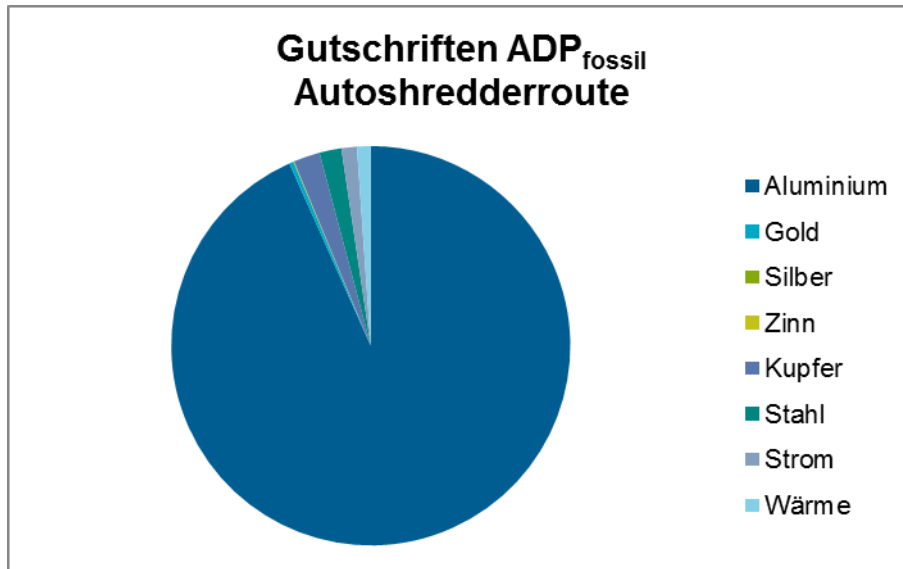
**Abbildung 5-17:  $ADP_{fossil}$ : Anteile der Prozesse der Autoshredderroute an den Gesamtaufwendungen**



Der Hauptbeitrag bei den Aufwendungen in der Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch stammt vom Aluminiumrecycling (61 %), durch seinen hohen Energiebedarf. Der Strombedarf (18 %) und der Transport (12 %) liefern weitere große Beiträge. Die übrigen 9 % teilen sich in absteigender Reihenfolge auf Stahlrecycling, Treibstoffbedarf und das thermische Kunststoffrecycling auf. Erdgas liefert mit knapp 40 % den höchsten Beitrag, Erdöl und Steinkohle mit jeweils rund einem Viertel die beiden weiteren wichtigen Beiträge von allen Energieträgern in dieser Kategorie.

Abbildung 5-18 zeigt die Gutschriften für die Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch der Autoshredderroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-18:  $ADP_{fossil}$ : Gutschriftenanteile für die Autoshredderroute**



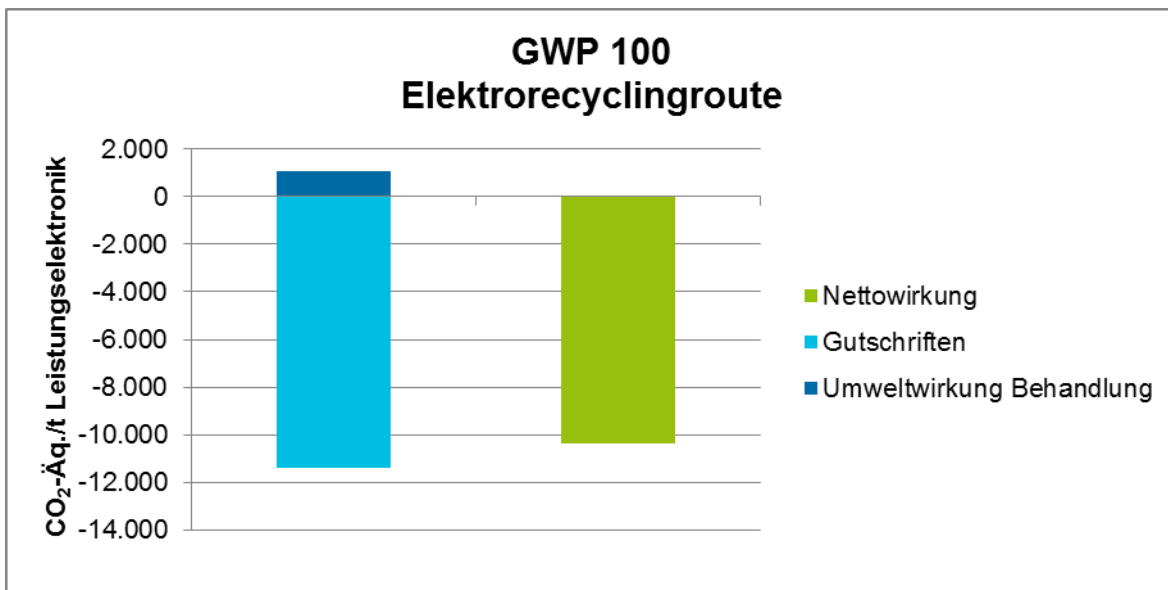
Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch stammt vom Aluminium (93 %). Dies geht auf den hohen Energiebedarf der Aluminiumgewinnung zurück. Die verbliebenen 7 % verteilen sich auf die übrigen Metalle. Steinkohle liefert mit knapp 60 % den höchsten Beitrag, Erdgas mit gut 20 % den zweitwichtigsten Beitrag von allen Energieträgern für die Gutschriften in dieser Kategorie.

## 5.2. Route 2a: Elektrorecyclingroute

### 5.2.1. Klimaerwärmungspotenzial (GWP)

Abbildung 5-19 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Elektrorecyclingroute für die Kategorie Klimaerwärmungspotenzial dargestellt.

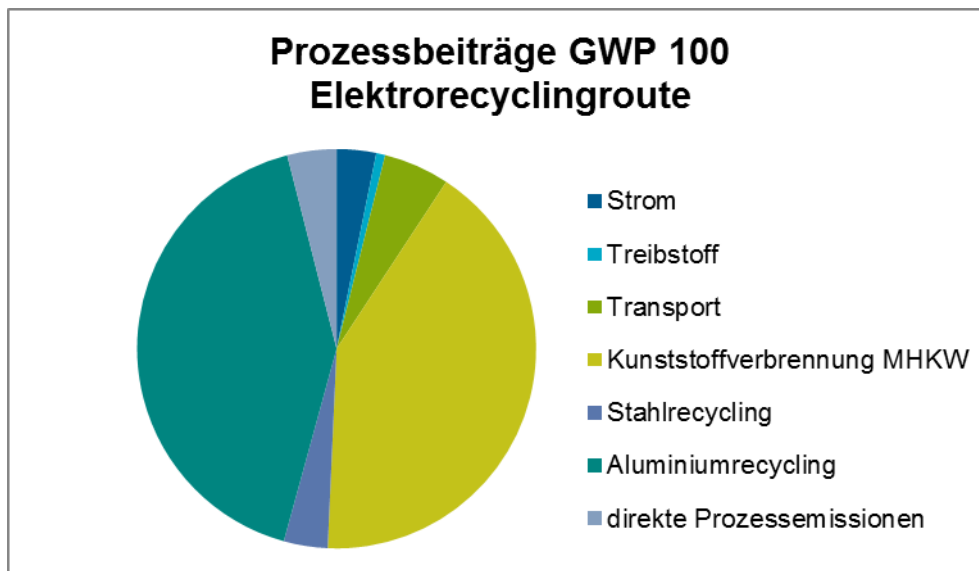
Abbildung 5-19: GWP: Gesamtwirkung Elektrorecyclingroute



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Elektrorecyclingroute verursacht Emissionen in Höhe von 1,05 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 11,4 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente ein.

Abbildung 5-20 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie Klimaerwärmungspotenzial der Elektrorecyclingroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

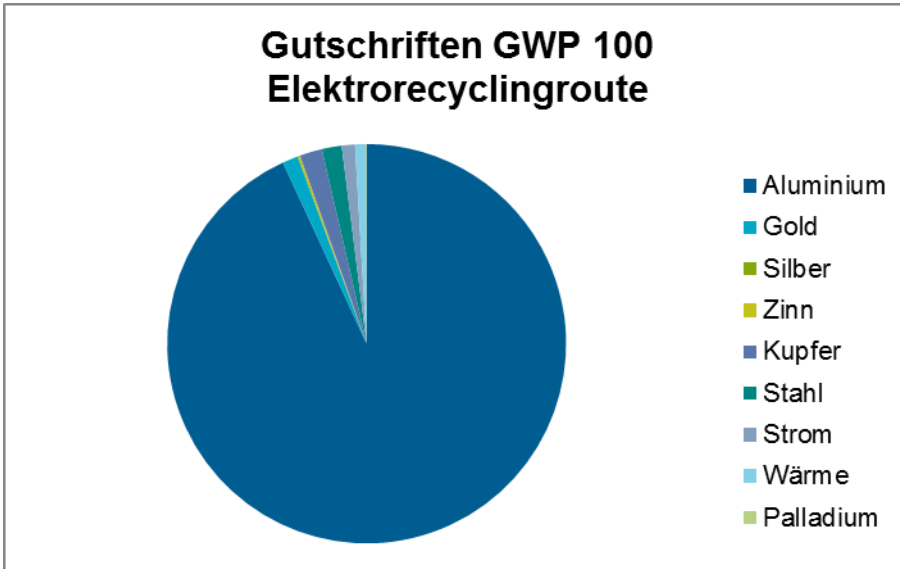
**Abbildung 5-20: GWP: Anteile der Prozesse der Elektrorecyclingroute an den Gesamtaufwendungen**



Die Hauptbeiträge zum Klimaerwärmungspotenzial kommen vom Aluminiumrecycling (42 %), welches für den Schmelzvorgang sehr viel Energie benötigt und zudem den größten Massenanteil der Leistungselektronik verwertet und von den Emissionen der Kunststoffverbrennung (41 %). Die übrigen 17 % teilen sich in absteigender Reihenfolge unter dem Transport, den direkten Prozessemissionen aus der Edelmetallverwertung, dem Stahlrecycling, dem Strombedarf für den Betrieb des Shredders und der Post-Shredder-Anlage und dem Treibstoff für Radlader/Gabelstapler auf. CO<sub>2</sub> liefert mit gut 97 % den höchsten Beitrag von allen Emissionen in dieser Kategorie.

Abbildung 5-21 zeigt die Gutschriften für die Kategorie Klimaerwärmungspotenzial der Elektrorecyclingroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-21: GWP: Gutschriftenanteile für die Elektrorecyclingroute**



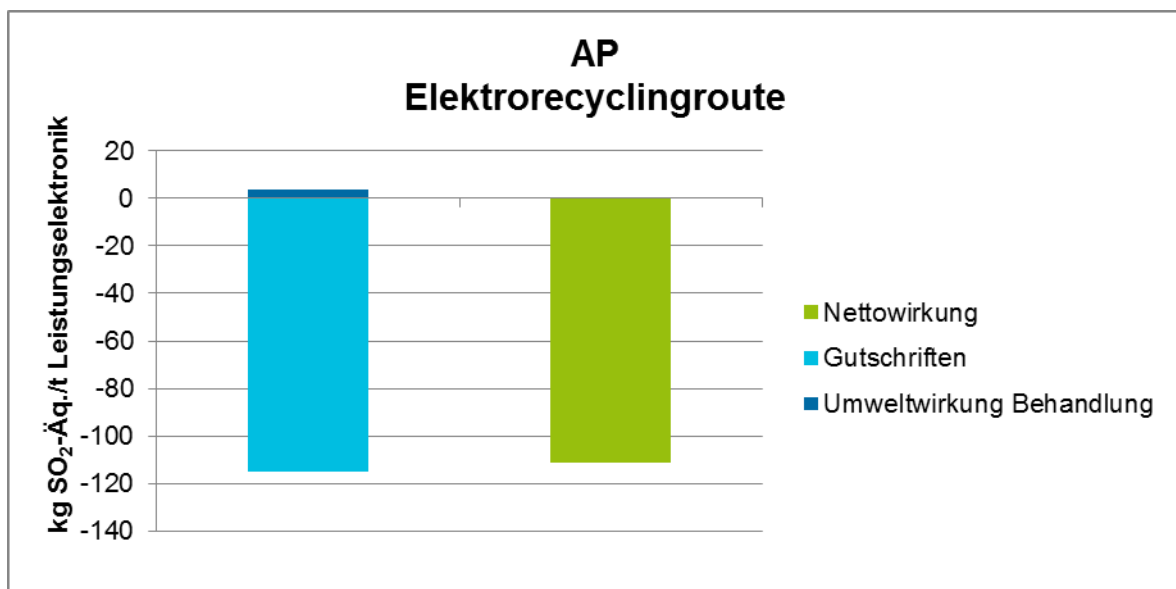
Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie Klimaerwärmungspotenzial stammt vom Aluminium (93 %). Dies liegt an der eingesparten Energie, welche die Herstellung von Aluminium benötigt. Die übrigen 7 % werden vor allem von Kupfer, Stahl und Gold sowie der bereitgestellten Wärme und dem Strom ausgefüllt. Die übrigen Metalle spielen keine Rolle in dieser Kategorie. Bemerkenswert ist, dass der geringe Massenanteil an Gold die gleiche Wirkung hat wie das Massenmaterial Stahl. CO<sub>2</sub> liefert mit gut 88 % den höchsten Beitrag von allen Emissionen für die Gutschriften in dieser Kategorie.



### 5.2.2. Versauerungspotenzial (AP)

Abbildung 5-22 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Elektrorecyclingroute für die Kategorie Versauerungspotenzial dargestellt.

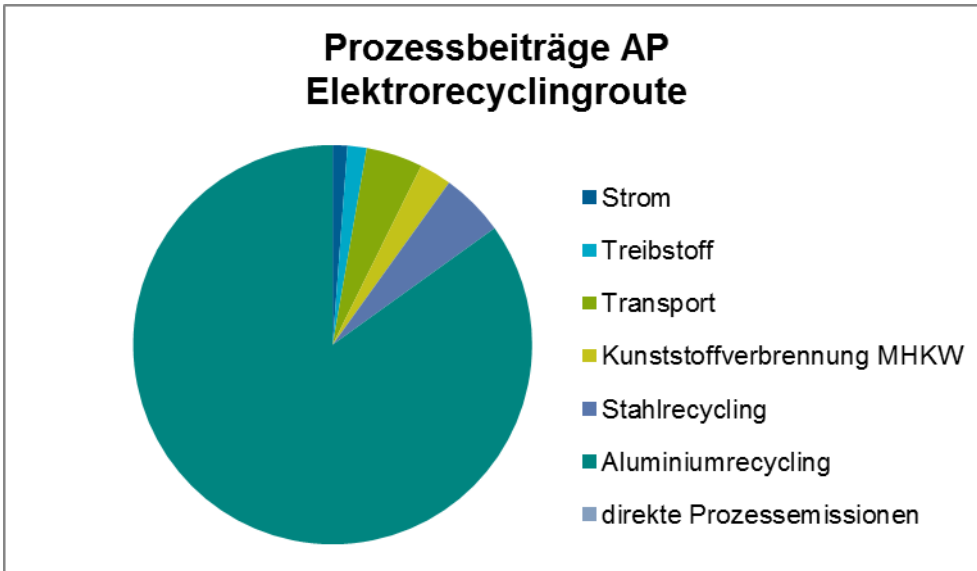
Abbildung 5-22: AP: Gesamtwirkung Elektrorecyclingroute



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Elektrorecyclingroute verursacht Emissionen in Höhe von 3,7 kg SO<sub>2</sub>-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 115 kg SO<sub>2</sub>-Äquivalente ein.

Abbildung 5-23 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie Versauerungspotenzial der Elektrorecyclingroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

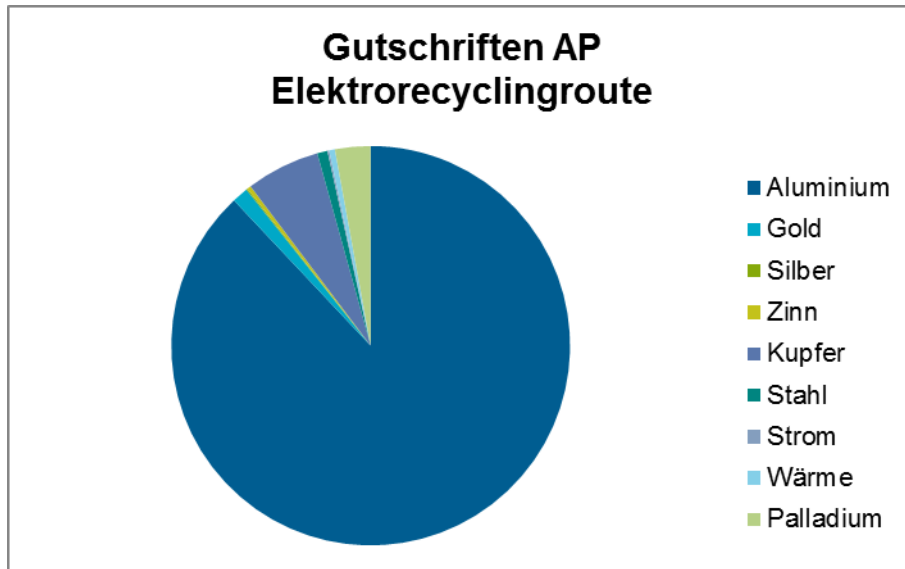
**Abbildung 5-23: AP: Anteile der Prozesse der Elektrorecyclingroute an den Gesamtaufwendungen**



Der Hauptbeitrag zum Versauerungspotenzial stammt vom Aluminiumrecycling (85 %), welches durch seinen Stromverbrauch, und die Bereitstellung von Metallen für den Schmelzprozess saure Emissionen verursacht. Die übrigen 15 % teilen sich in absteigender Reihenfolge unter dem Stahlrecycling (5 %), dem Transport (5 %), der Kunststoffverbrennung (3 %), dem Treibstoffbedarf (1 %) und dem Strombedarf (1 %) auf. SO<sub>2</sub> liefert mit gut 74 % den höchsten Beitrag, NO<sub>x</sub> mit knapp 22 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen in dieser Kategorie.

Abbildung 5-24 zeigt die Gutschriften für die Kategorie Versauerungspotenzial der Elektrorecyclingroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-24: AP: Gutschriftenanteile für die Elektrorecyclingroute**

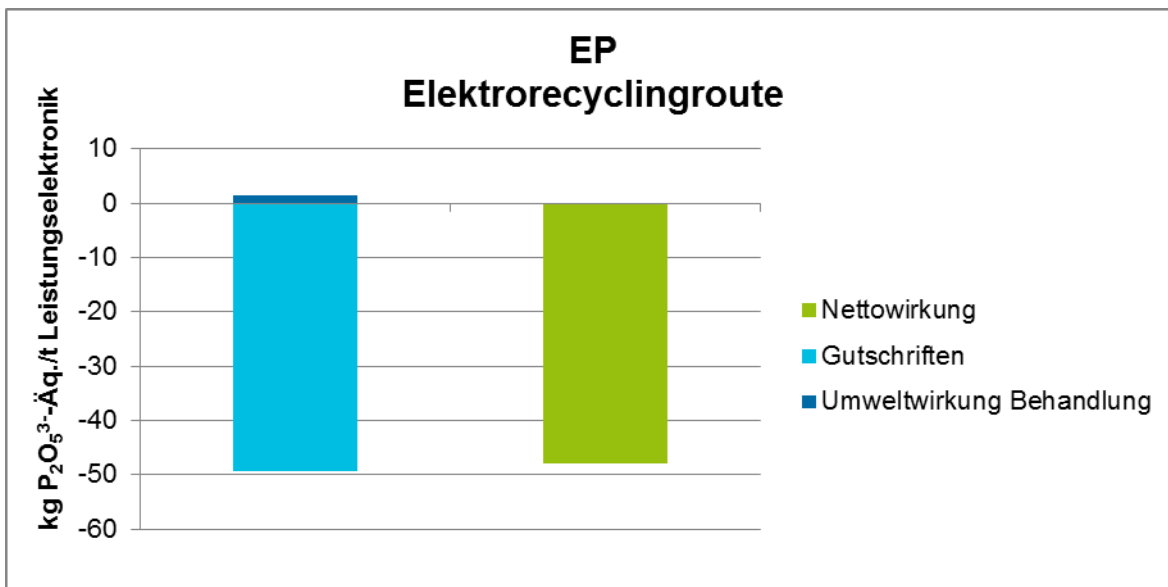


Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie Versauerungspotenzial stammt vom Aluminium (88 %). Dieser Beitrag ist vor allem dem vermiedenen Energiebedarf und den damit verbundenen sauren Emissionen zuzuschreiben. Einen weiteren Beitrag liefert das recycelte Kupfer mit 6 %. Die verbliebenen 6 % teilen sich auf die übrigen Metalle sowie Strom und Wärme auf. Bemerkenswert ist, dass Palladium trotz der geringen Menge immer noch 3 % Beitrag leistet. SO<sub>2</sub> liefert mit gut 80 % den höchsten Beitrag, NO<sub>x</sub> mit gut 15 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

### 5.2.3. Eutrophierungspotenzial (EP)

Abbildung 5-25 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Elektrorecyclingroute für die Kategorie Eutrophierungspotenzial dargestellt.

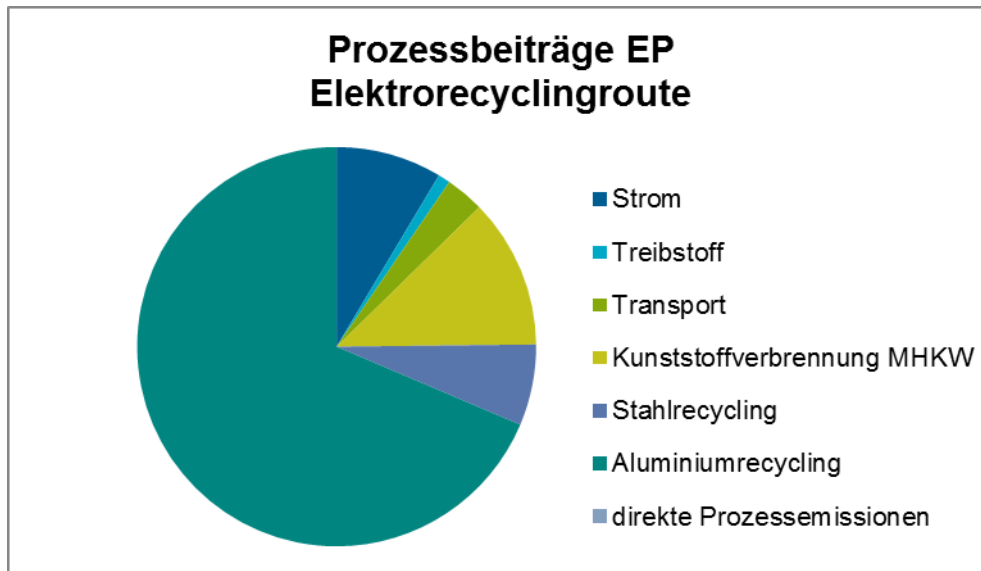
Abbildung 5-25: EP: Gesamtwirkung Elektrorecyclingroute



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Elektrorecyclingroute verursacht Emissionen in Höhe von 1,52 kg Phosphat-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 49,3 kg Phosphat-Äquivalente ein.

Abbildung 5-26 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie Eutrophierungspotenzial der Elektrorecyclingroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

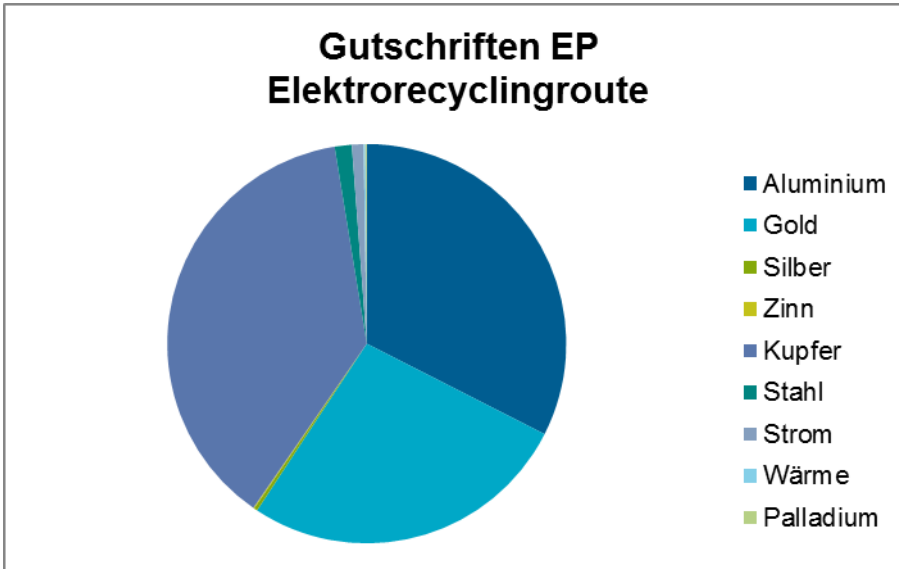
**Abbildung 5-26: EP: Anteile der Prozesse der Elektrorecyclingroute an den Gesamtaufwendungen**



Der Hauptbeitrag für die Kategorie Eutrophierungspotenzial stammt vom Aluminiumrecycling (69 %). Hier sind die Strombereitstellung und die notwendigen Metalle für das Aluminiumrecycling die größten Emittenten. Die thermische Kunststoffverwertung hat mit 12 % ebenfalls noch einen größeren Anteil. Der Strombedarf und das Stahlrecycling tragen jeweils 9 % bzw. 7 % bei. Die übrigen 3 % teilen sich auf Transport und Treibstoffbedarf auf. Phosphat liefert mit rund 60 % den höchsten Beitrag, NO<sub>x</sub> mit gut 14 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen in dieser Kategorie.

Abbildung 5-27 zeigt die Gutschriften für die Kategorie Eutrophierungspotenzial der Elektrorecyclingroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-27: EP: Gutschriftenanteile für die Elektrorecyclingroute**

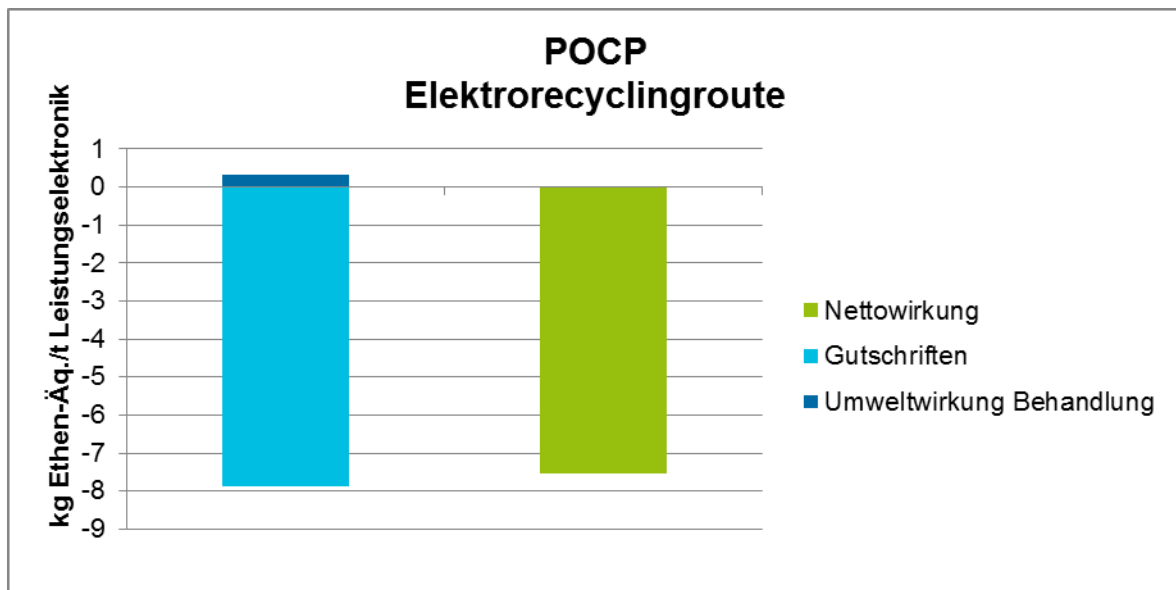


Die drei größten Gutschriftenbeiträge der Kategorie Eutrophierungspotenzial stammen von Kupfer (38 %), Aluminium (32 %) und Gold (27 %). Der Beitrag des Kupfers und des Goldes stammt vor allem von den vermiedenen Phosphatmissionen aus den Rückstandsschlämmen (Tailings), der des Aluminiums aus dem hohen vermiedenen Strombedarf der Schmelzflusselektrolyse. Die übrigen 3 % verteilen sich zu fast gleichen Teilen auf Stahl und Strom, während die übrigen Gutschriften vernachlässigbar sind. Phosphat liefert mit rund 64 % den höchsten Beitrag, NO<sub>x</sub> mit gut 9 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

### 5.2.4. Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)

Abbildung 5-28 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Elektrorecyclingroute für die Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial dargestellt.

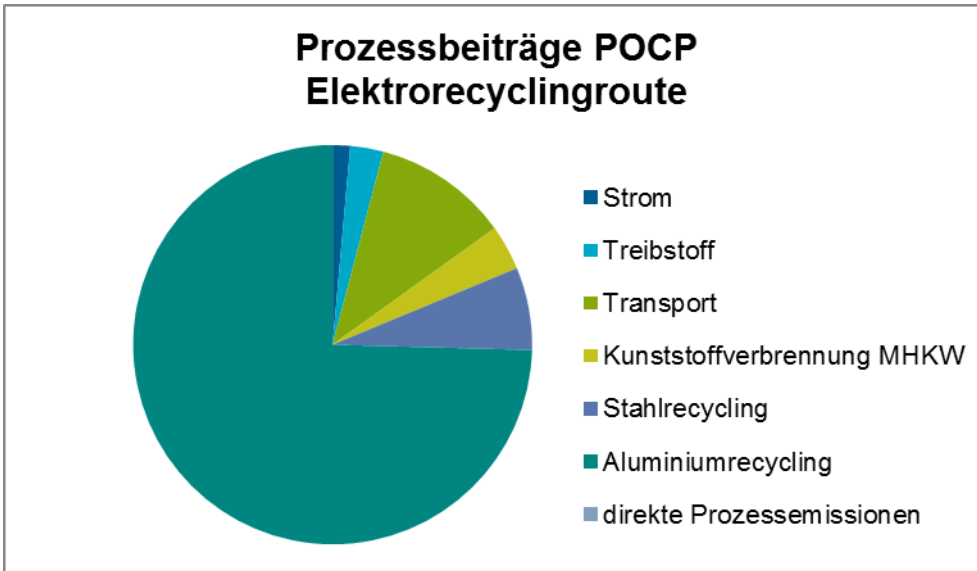
**Abbildung 5-28: POCP: Gesamtwirkung Elektrorecyclingroute**



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Elektrorecyclingroute verursacht Emissionen in Höhe von 0,33 kg Ethen-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 7,87 kg Ethen-Äquivalente ein.

Abbildung 5-29 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial der Elektrorecyclingroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

**Abbildung 5-29: POCP: Anteile der Prozesse der Elektrorecyclingroute an den Gesamtaufwendungen**

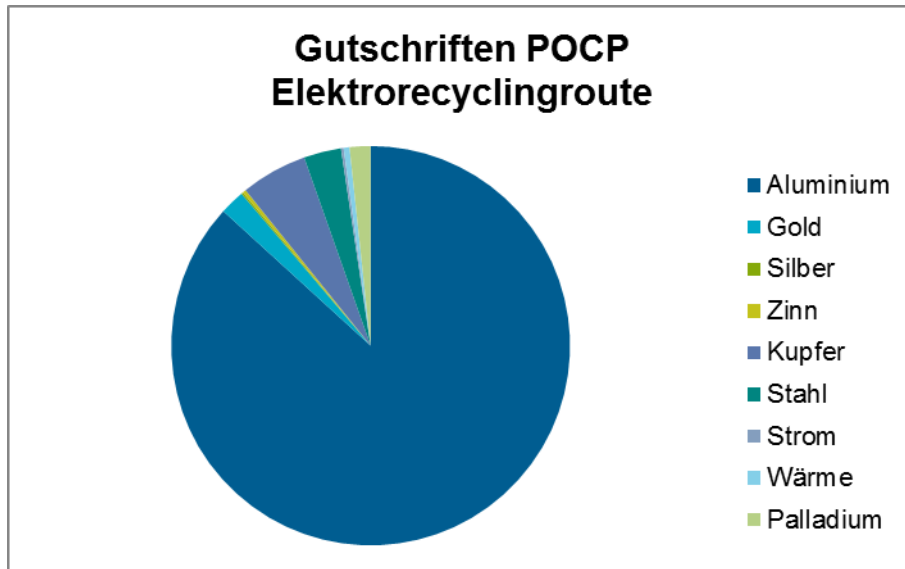


Der Hauptbeitrag für die Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial stammt vom Aluminiumrecycling (75 %). Hier entstammen die relevanten Emissionen vor allem aus der Bereitstellung der Metalle, welche für das Aluminiumrecycling benötigt werden. Der Transport trägt durch seine Kohlenwasserstoffemissionen 11 % bei. Das Stahlrecycling trägt 7 % bei. Die übrigen 7 % teilen sich in absteigender Reihenfolge unter dem thermischen Kunststoffrecycling, dem Treibstoffbedarf und dem Strombedarf auf. Die Gruppe der NMVOC liefert mit knapp 41 % den höchsten Beitrag, SO<sub>2</sub> mit gut 33 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen in dieser Kategorie.



Abbildung 5-30 zeigt die Gutschriften für die Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial der Elektrorecyclingroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-30: POCP: Gutschriftenanteile für die Elektrorecyclingroute**

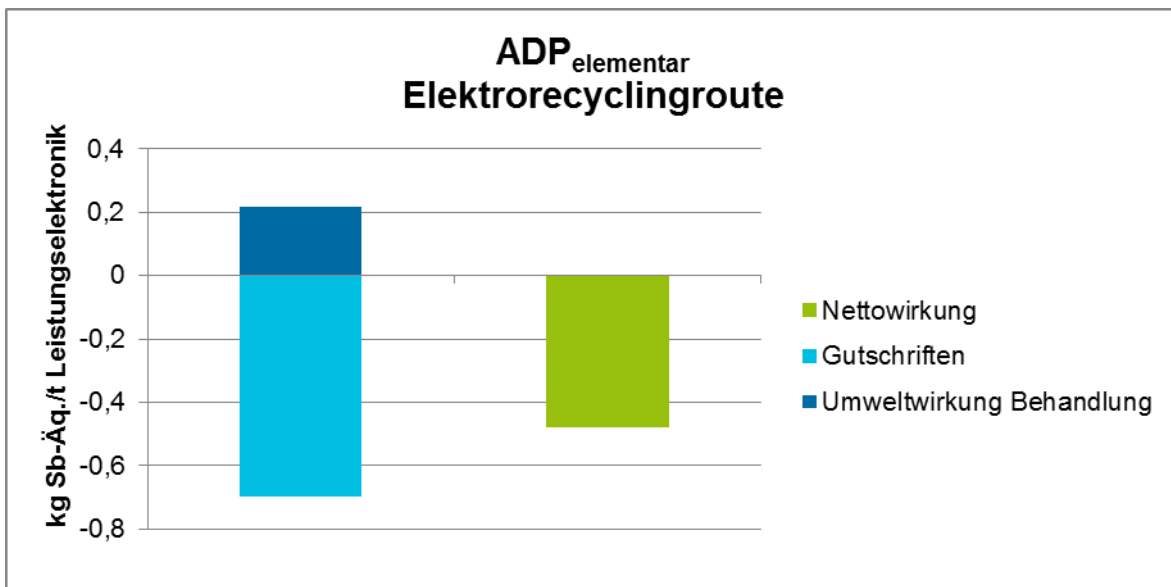


Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial stammt vom Aluminium (87 %). Dieser Beitrag kommt vor allem vom hohen Strombedarf der Schmelzflusselektrolyse. Kupfer trägt mit 5 %, Stahl mit 3 % und Gold sowie Palladium jeweils mit 2 % zu den Gutschriften bei. Die übrigen Gutschriften sind vernachlässigbar. SO<sub>2</sub> liefert mit knapp 47 % den höchsten Beitrag, CO mit gut 20 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

**5.2.5. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP<sub>elementar</sub>)**

Abbildung 5-31 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Elektrorecyclingroute für die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch dargestellt.

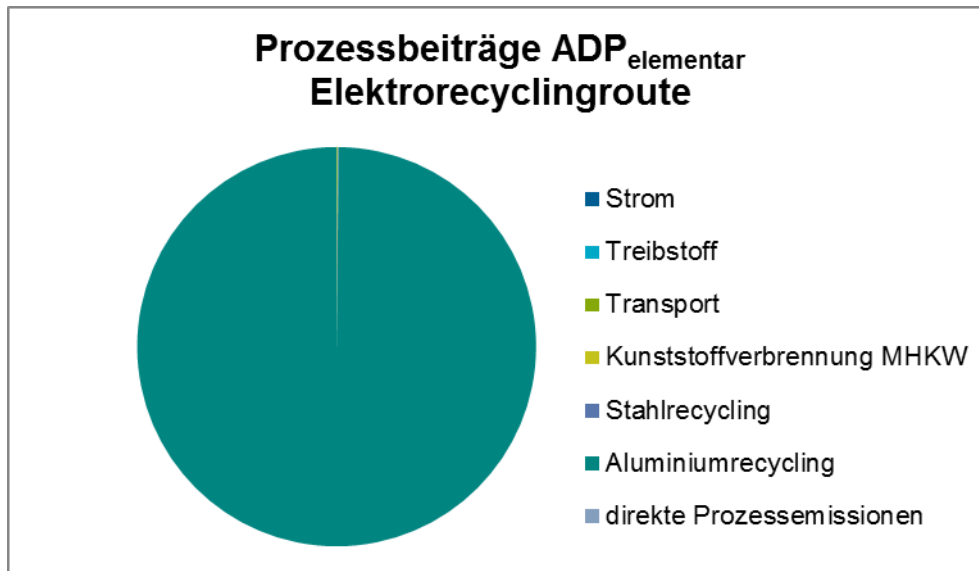
**Abbildung 5-31: ADP<sub>elementar</sub>: Gesamtwirkung Elektrorecyclingroute**



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Elektrorecyclingroute verursacht Emissionen in Höhe von 0,22 kg Sb-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 0,7 kg Sb-Äquivalente ein.

Abbildung 5-32 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch der Elektrorecyclingroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

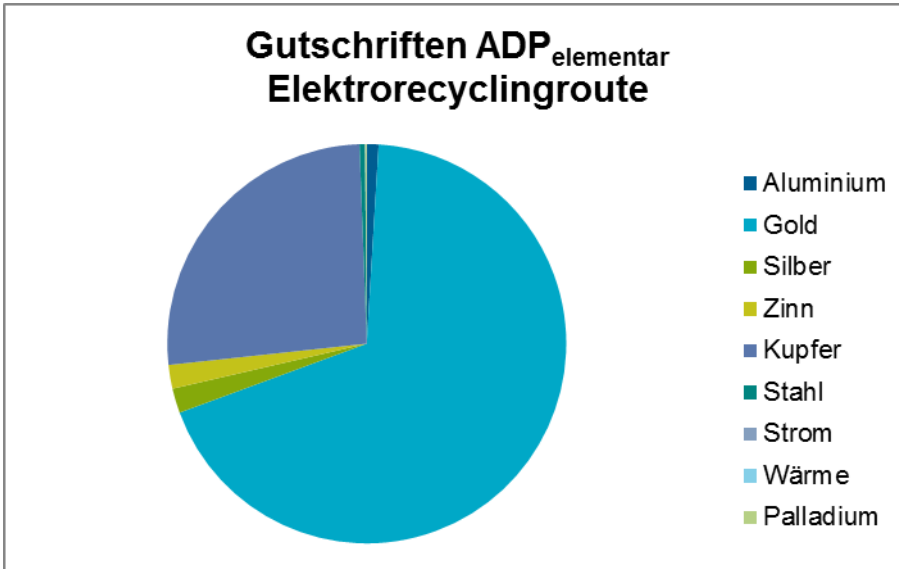
**Abbildung 5-32: ADP<sub>elementar</sub>: Anteile der Prozesse der Elektrorecyclingroute an den Gesamtaufwendungen**



Der Hauptbeitrag der Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch mit fast 100 % stammt vom Aluminiumrecycling. Hier entstammt der Hauptteil vor allem aus der Bereitstellung von Ressourcen, welche für das Aluminiumrecycling benötigt werden. Blei liefert mit knapp 50 % den höchsten Beitrag, Cadmium mit gut 34 % den zweithöchsten Beitrag von allen Ressourcen in dieser Kategorie. Diese beiden Metalle werden für die Bereitstellung des für das Aluminiumrecycling notwendige Zinks verbraucht.

Abbildung 5-33 zeigt die Gutschriften für die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch der Elektrorecyclingroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-33:  $ADP_{\text{elementar}}$ : Gutschriftenanteile für die Elektrorecyclingroute**

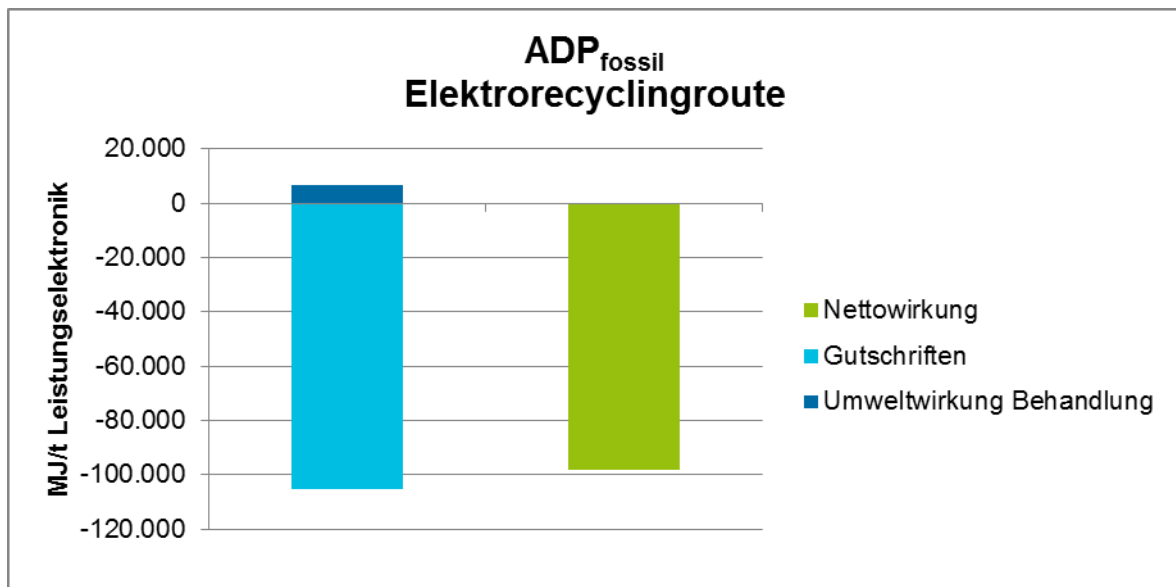


Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch stammt vom Gold (68 %). Auf Grund der geringen Reservenmenge (52 Sb-Äq./kg), hat das geringe Gewicht des Goldes dennoch diesen hohen Beitrag. Kupfer liefert einen Beitrag von 26 %. Die verbliebenen 6 % verteilen sich auf die übrigen Metalle. Gold liefert mit 67 % den höchsten Beitrag, Kupfer mit knapp 20 % den zweithöchsten Beitrag von allen Ressourcen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

### 5.2.6. Fossiler Ressourcenverbrauch ( $ADP_{fossil}$ )

Abbildung 5-34 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Elektrozyclingroute für die Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch dargestellt.

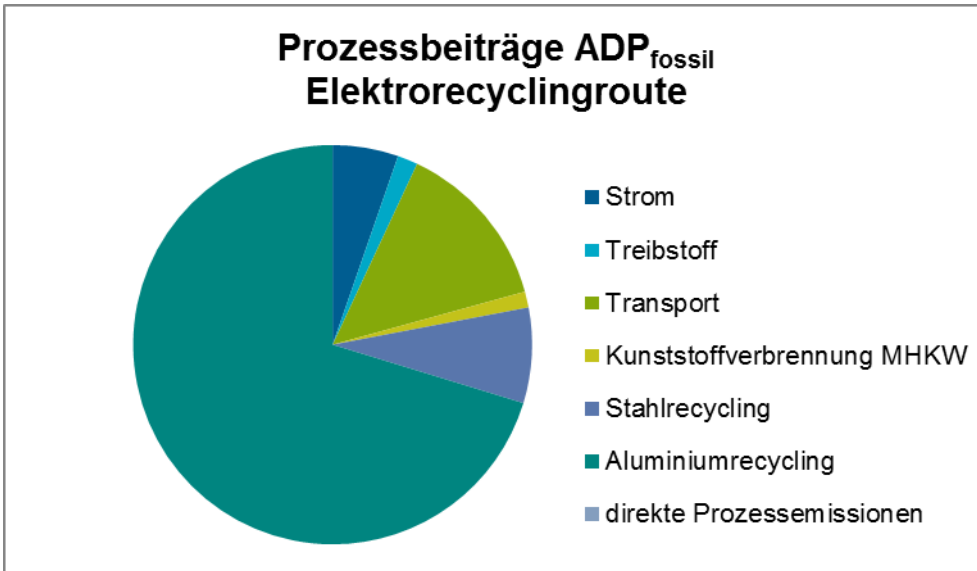
Abbildung 5-34:  $ADP_{fossil}$ : Gesamtwirkung Elektrozyclingroute



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Elektrozyclingroute verursacht Emissionen in Höhe von 6.670 MJ, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 105.000 MJ ein.

Abbildung 5-35 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch der Elektrorecyclingroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

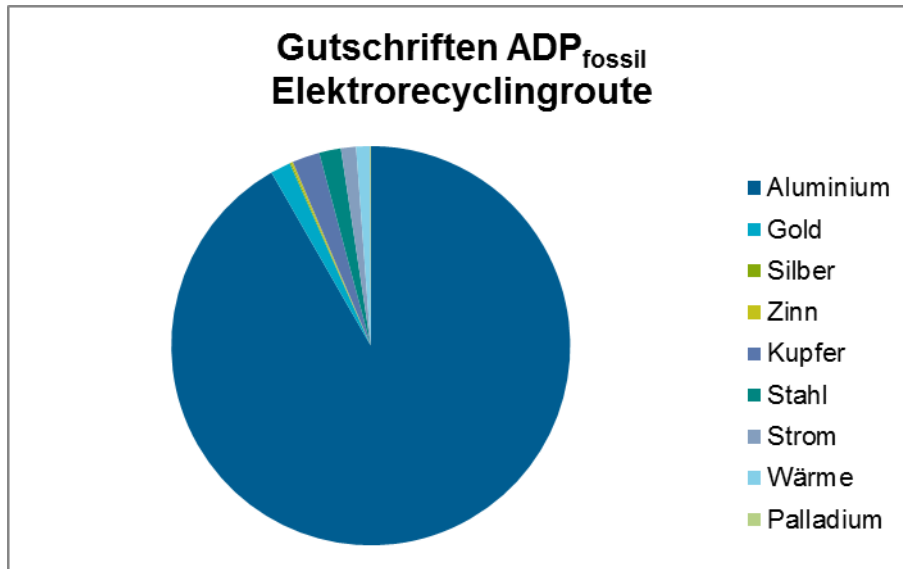
**Abbildung 5-35:  $ADP_{fossil}$ : Anteile der Prozesse der Elektrorecyclingroute an den Gesamtaufwendungen**



Der Hauptbeitrag der Aufwendungen in der Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch stammt vom Aluminiumrecycling (70 %), durch seinen hohen Energiebedarf. Der Transport (14 %) und das Stahlrecycling (8 %) liefern weitere große Beiträge. Die übrigen 8 % teilen sich in absteigender Reihenfolge auf Strombedarf, Treibstoffbedarf und das thermische Kunststoffrecycling auf. Erdgas liefert mit knapp 43 % den höchsten Beitrag, Erdöl und Steinkohle mit jeweils rund einem Viertel die beiden weiteren wichtigen Beiträge von allen Energieträgern in dieser Kategorie.

Abbildung 5-36 zeigt die Gutschriften für die Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch der Elektrorecyclingroute aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-36:  $ADP_{fossil}$ : Gutschriftenanteile für die Elektrorecyclingroute**



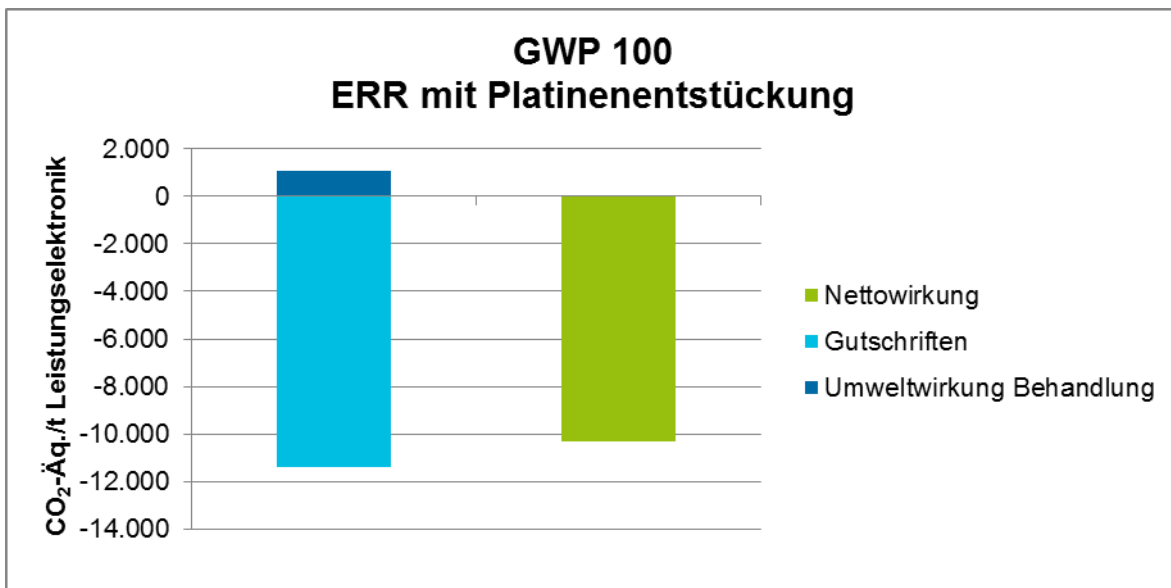
Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch stammt vom Aluminium (92 %). Dies geht auf den hohen Energiebedarf der Aluminiumgewinnung zurück. Die verbliebenen 8 % verteilen sich auf die übrigen Metalle. Steinkohle liefert mit gut 59 % den höchsten Beitrag, Erdgas mit knapp 21 % den zweitwichtigsten Beitrag von allen Energieträgern für die Gutschriften in dieser Kategorie.

### 5.3. Route 2b: Elektrorecyclingroute (ERR) mit chemischer Platinentstückung

#### 5.3.1. Klimaerwärmungspotenzial (GWP)

Abbildung 5-37 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung für die Kategorie Klimaerwärmungspotenzial dargestellt.

Abbildung 5-37: GWP: Gesamtwirkung ERR mit chemischer Platinentstückung

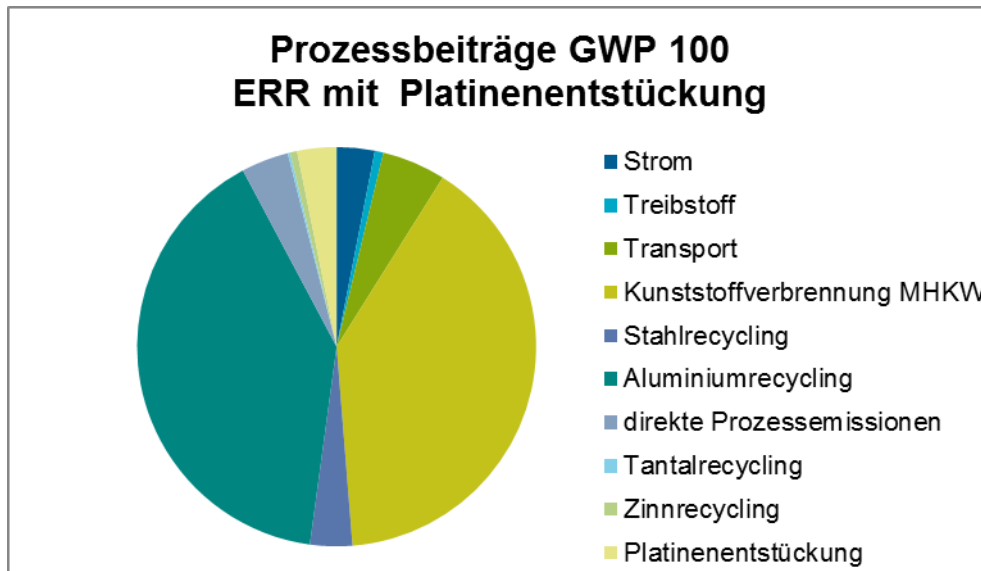


Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung verursacht Emissionen in Höhe von 1,09 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 11,4 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente ein.



Abbildung 5-38 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie Klimaerwärmungspotenzial der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

**Abbildung 5-38: GWP: Anteile der Prozesse der ERR mit chemischer Platinentstückung an den Gesamtaufwendungen**



Die Hauptbeiträge zum Klimaerwärmungspotenzial kommen vom Aluminiumrecycling (40 %), welches für den Schmelzvorgang sehr viel Energie benötigt und zudem den größten Massenanteil der Leistungselektronik verwertet sowie von den Emissionen der Kunststoffverbrennung (40 %). Der Transport trägt 5 % bei. Die direkten Prozessemissionen aus der Edelmetallverwertung haben einen Anteil von 4 %. Das Stahlrecycling, die Platinentstückung und der Strombedarf für den Betrieb des Shredders und der Post-Shredder-Anlage tragen jeweils 3 % bei. Die übrigen 2 % teilen sich unter dem Treibstoff für Radlader/Gabelstapler, dem Zinnrecycling und dem Tantalrecycling auf. CO<sub>2</sub> liefert mit gut 97 % den höchsten Beitrag von allen Emissionen in dieser Kategorie.

Durch die chemische Platinentstückung kommt es zu einer Erhöhung der Aufwendungsemissionen von 3,8 % oder 40 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten.

Abbildung 5-39 zeigt die Gutschriften für die Kategorie Klimaerwärmungspotenzial der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-39: GWP: Gutschriftenanteile für die ERR mit chemischer Platinentstückung**



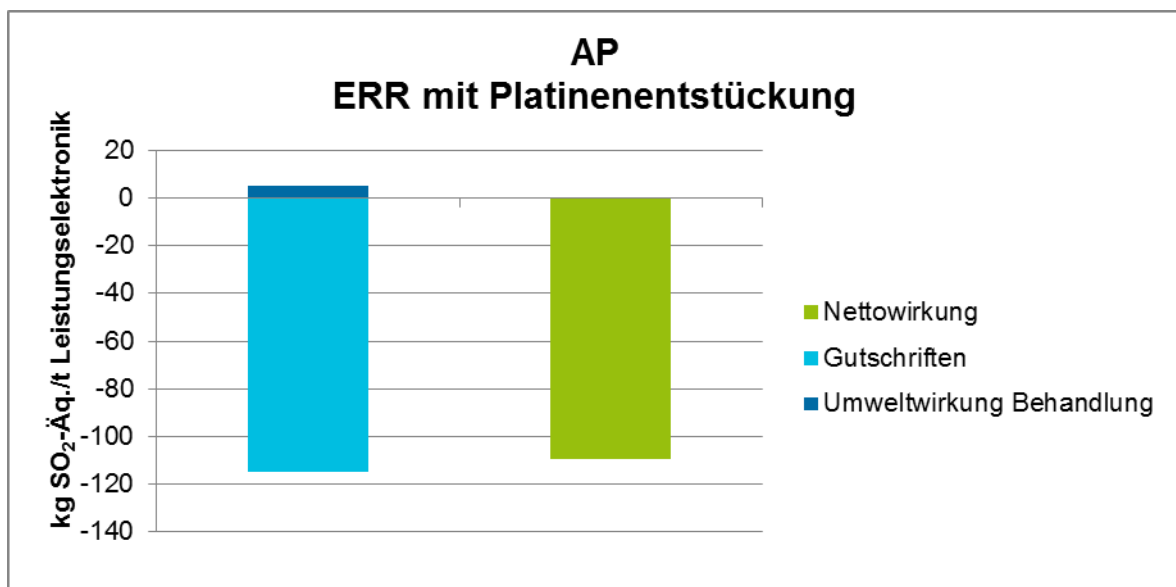
Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie Klimaerwärmungspotenzial stammt vom Aluminium (93 %). Dies liegt an der eingesparten Energie, welche die Herstellung von Aluminium benötigt. Die übrigen 7 % teilen werden vor allem von Kupfer, Stahl und Gold sowie der bereitgestellten Wärme und dem Strom ausgefüllt. Die übrigen Metalle spielen keine Rolle in dieser Kategorie. Bemerkenswert ist, dass der geringe Massenanteil an Gold die gleiche Wirkung hat wie das Massenmaterial Stahl. CO<sub>2</sub> liefert mit gut 88 % den höchsten Beitrag von allen Emissionen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

Durch die chemische Platinentstückung kommt es zu keiner Erhöhung der Gutschriften.

### 5.3.2. Versauerungspotenzial (AP)

Abbildung 5-40 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung für die Kategorie Versauerungspotenzial dargestellt.

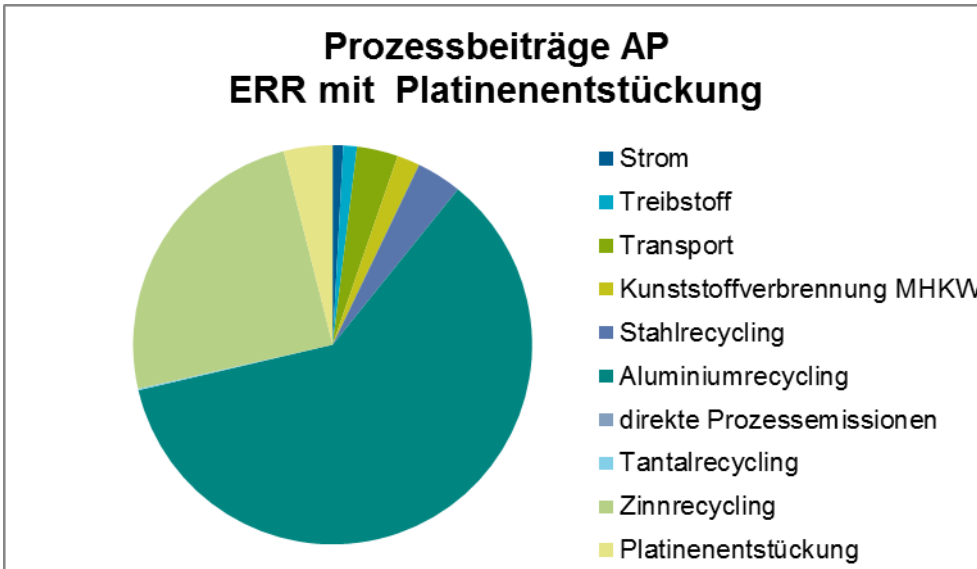
**Abbildung 5-40: AP: Gesamtwirkung ERR mit chemischer Platinentstückung**



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung verursacht Emissionen in Höhe von 5,2 kg SO<sub>2</sub>-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 115 kg SO<sub>2</sub>-Äquivalente ein.

Abbildung 5-41 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie Versauerungspotenzial der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

**Abbildung 5-41: AP: Anteile der Prozesse der ERR mit chemischer Platinentstückung an den Gesamtaufwendungen**

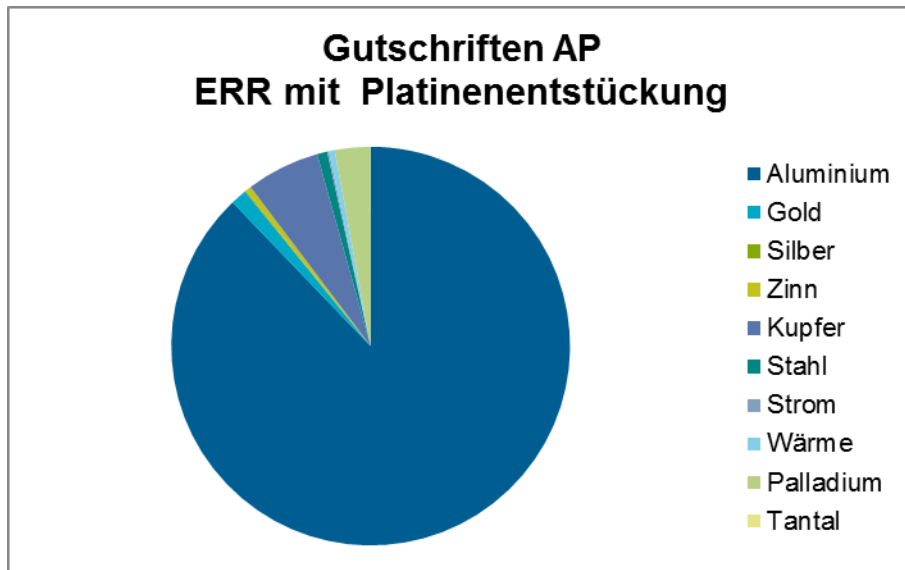


Der Hauptbeitrag der Aufwendungen zum Versauerungspotenzial stammt vom Aluminiumrecycling (61 %), welches durch seinen Stromverbrauch, und die Bereitstellung von Metallen für den Schmelzprozess saure Emissionen verursacht. 25 % der Emissionen resultieren aus dem Zinnrecycling, welches eine Röstung des Zinnsulfids vorsieht und somit direkte SO<sub>2</sub>-Emissionen zur Folge hat. Die übrigen 14 % teilen sich in absteigender Reihenfolge unter der Platinentstückung (4 %), dem Stahlrecycling (4 %), dem Transport (3 %), der Kunststoffverbrennung (2 %) und den übrigen Prozessen auf. SO<sub>2</sub> liefert mit gut 80 % den höchsten Beitrag, NO<sub>x</sub> mit gut 16 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen in dieser Kategorie.

Durch die chemische Platinentstückung kommt es zu einer Erhöhung der Aufwendungsemissionen von 40,5 % oder 1,5 kg SO<sub>2</sub>-Äquivalenten.

Abbildung 5-42 zeigt die Gutschriften für die Kategorie Versauerungspotenzial der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-42: AP: Gutschriftenanteile für die ERR mit chemischer Platinentstückung**



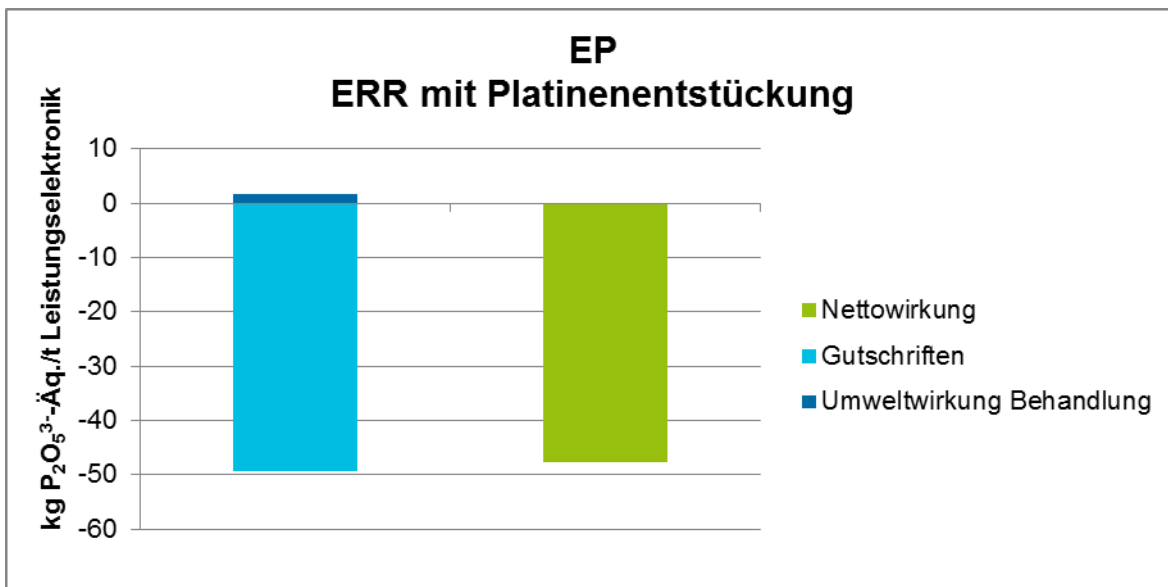
Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie Versauerungspotenzial stammt vom Aluminium (88 %). Dieser Beitrag ist vor allem dem vermiedenen Energiebedarf und den damit verbundenen sauren Emissionen zuzuschreiben. Einen weiteren Beitrag liefert das recycelte Kupfer mit 6 %. Die verbliebenen 6 % teilen sich auf die übrigen Metalle sowie Strom und Wärme auf. Bemerkenswert ist, dass Palladium trotz der geringen Menge immer noch 3 % Beitrag leistet. SO<sub>2</sub> liefert mit gut 80 % den höchsten Beitrag, NO<sub>x</sub> mit gut 15 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

Durch die chemische Platinentstückung kommt es zu keiner Erhöhung der Gutschriften.

### 5.3.3. Eutrophierungspotenzial (EP)

Abbildung 5-43 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung für die Kategorie Eutrophierungspotenzial dargestellt.

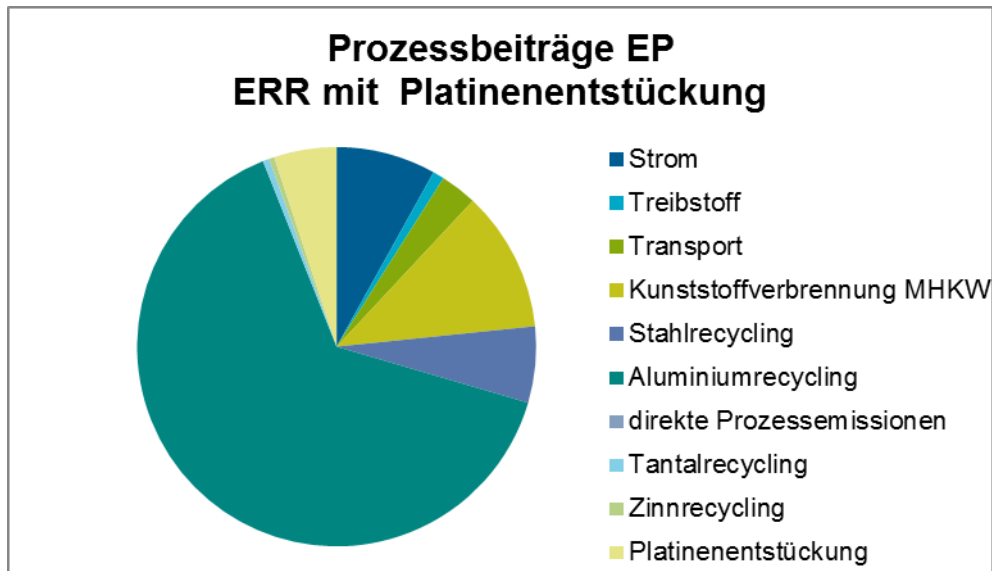
**Abbildung 5-43: EP: Gesamtwirkung ERR mit chemischer Platinentstückung**



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung verursacht Emissionen in Höhe von 1,62 kg Phosphat-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 49,3 kg Phosphat-Äquivalente ein.

Abbildung 5-44 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie Eutrophierungspotenzial der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

**Abbildung 5-44: EP: Anteile der Prozesse der ERR mit chemischer Platinentstückung an den Gesamtaufwendungen**

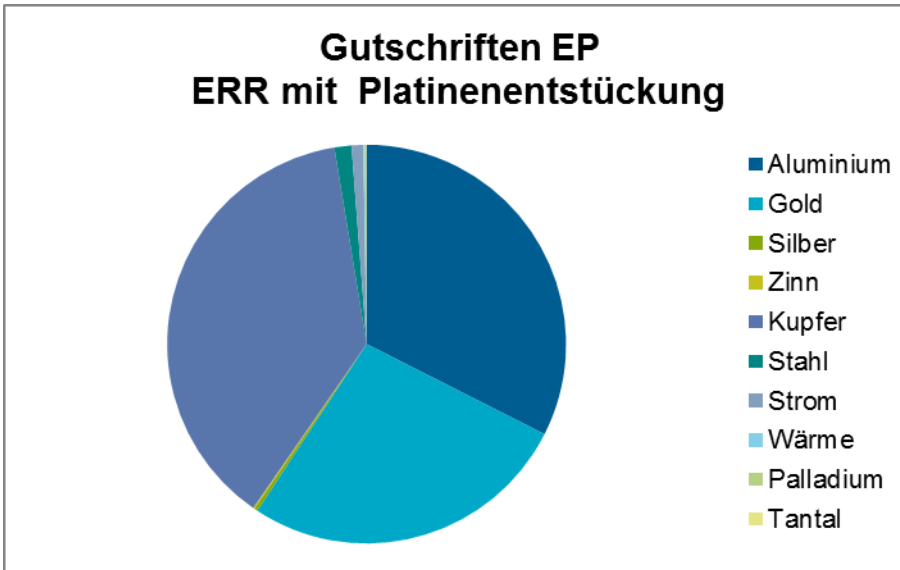


Der Hauptbeitrag für die Aufwendungen in der Kategorie Eutrophierungspotenzial stammt vom Aluminiumrecycling (64 %). Hier sind die Strombereitstellung und die notwendigen Metalle für das Aluminiumrecycling die größten Emittenten. Die thermische Kunststoffverwertung hat mit 11 % ebenfalls noch einen größeren Anteil. Der Strombedarf, das Stahlrecycling und die Platinentstückung tragen jeweils 8 %, 6 % bzw. 5 % bei. Die übrigen 6 % teilen sich auf die übrigen Prozesse auf. Phosphat liefert mit rund 60 % den höchsten Beitrag, NO<sub>x</sub> mit knapp 14 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen in dieser Kategorie.

Durch die chemische Platinentstückung kommt es zu einer Erhöhung der Aufwendungsemissionen von 6,6 % oder 0,1 kg Phosphat-Äquivalenten.

Abbildung 5-45 zeigt die Gutschriften für die Kategorie Eutrophierungspotenzial der Elektrozyclingroute mit chemischer Platinentstückung aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-45: EP: Gutschriftenanteile für die ERR mit chemischer Platinentstückung**



Die drei größten Gutschriftenbeiträge der Kategorie Eutrophierungspotenzial stammen von Kupfer (38 %), Aluminium (32 %) und Gold (27 %). Der Beitrag des Kupfers und des Goldes stammt vor allem von den vermiedenen Phosphatemissionen aus den Rückstandsschlämmen (Tailings), der des Aluminiums aus dem vermiedenen hohen Strombedarf der Schmelzflusselektrolyse. Die übrigen 3 % verteilen sich zu fast gleichen Teilen auf Stahl und Strom, während die übrigen Gutschriften vernachlässigbar sind. Phosphat liefert mit rund 64 % den höchsten Beitrag, NO<sub>x</sub> mit gut 9 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

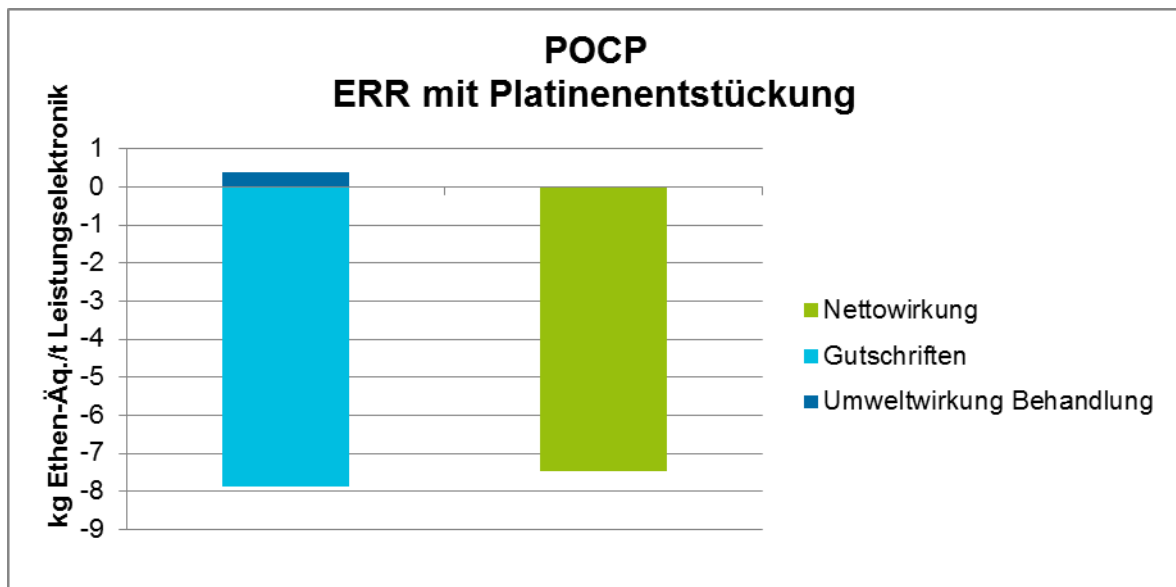
Durch die chemische Platinentstückung kommt es zu keiner Erhöhung der Gutschriften.



### 5.3.4. Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)

Abbildung 5-46 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung für die Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial dargestellt.

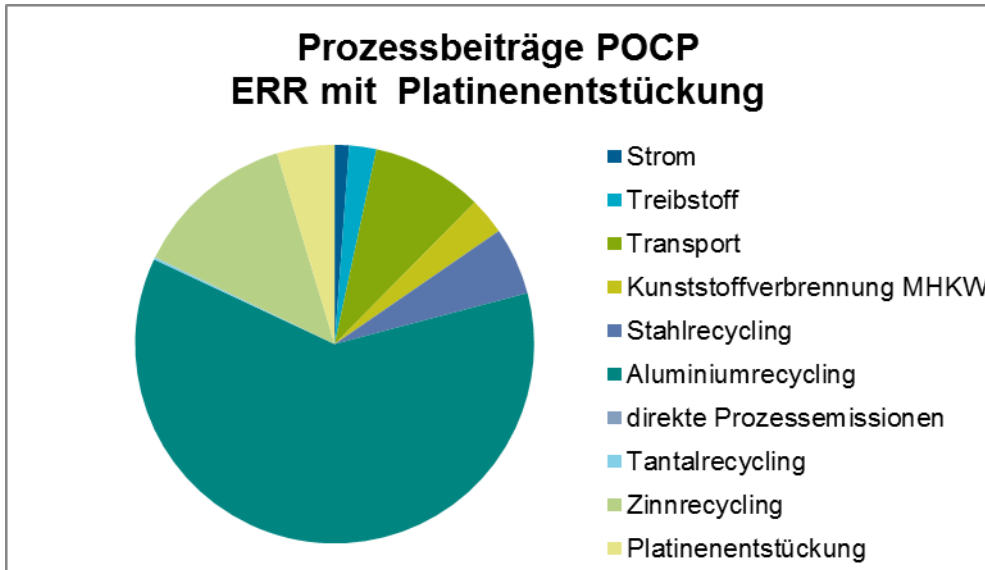
**Abbildung 5-46: POCP: Gesamtwirkung ERR mit chemischer Platinentstückung**



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung verursacht Emissionen in Höhe von 0,4 kg Ethen-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 7,88 kg Ethen-Äquivalente ein.

Abbildung 5-47 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

**Abbildung 5-47: POCP: Anteile der Prozesse der ERR mit chemischer Platinentstückung an den Gesamtaufwendungen**

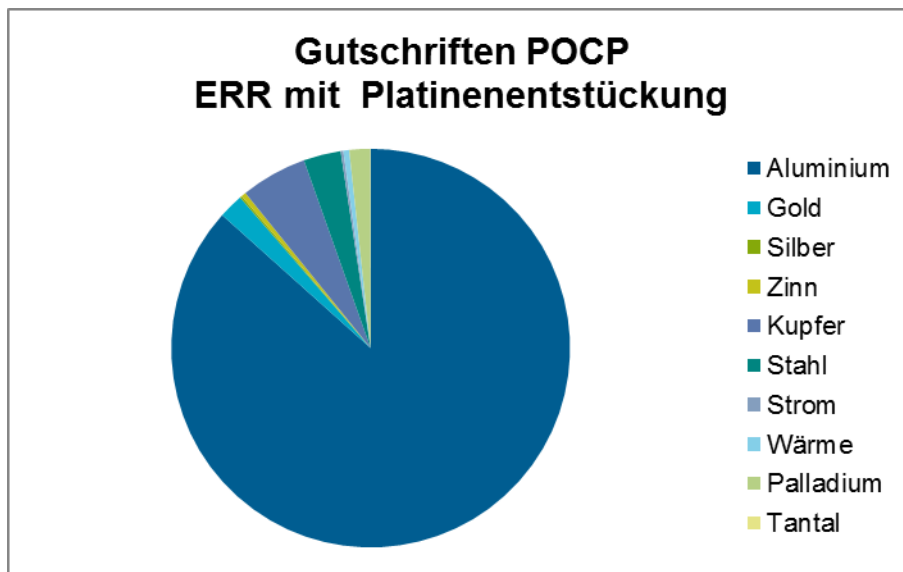


Der Hauptbeitrag für die Aufwendungen in der Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial stammt vom Aluminiumrecycling (61 %). Hier entstammen die relevanten Emissionen vor allem aus der Bereitstellung der Metalle, welche für das Aluminiumrecycling benötigt werden. Das Zinnrecycling mit seinen SO<sub>2</sub>-Emissionen trägt 13 % bei. Der Transport trägt durch seine Kohlenwasserstoffemissionen 9 % bei. Das Stahlrecycling und die Platinentstückung tragen beide jeweils 5 % bei. Die übrigen 7 % teilen sich auf die übrigen Prozesse auf. SO<sub>2</sub> liefert mit 42 % den höchsten Beitrag, die Gruppe der NMVOC mit knapp 36 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen in dieser Kategorie.

Durch die chemische Platinentstückung kommt es zu einer Erhöhung der Aufwendungsemissionen von 22,1 % oder 0,072 kg Ethen-Äquivalenten.

Abbildung 5-48 zeigt die Gutschriften für die Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-48: POCP: Gutschriftenanteile für die ERR mit chemischer Platinentstückung**



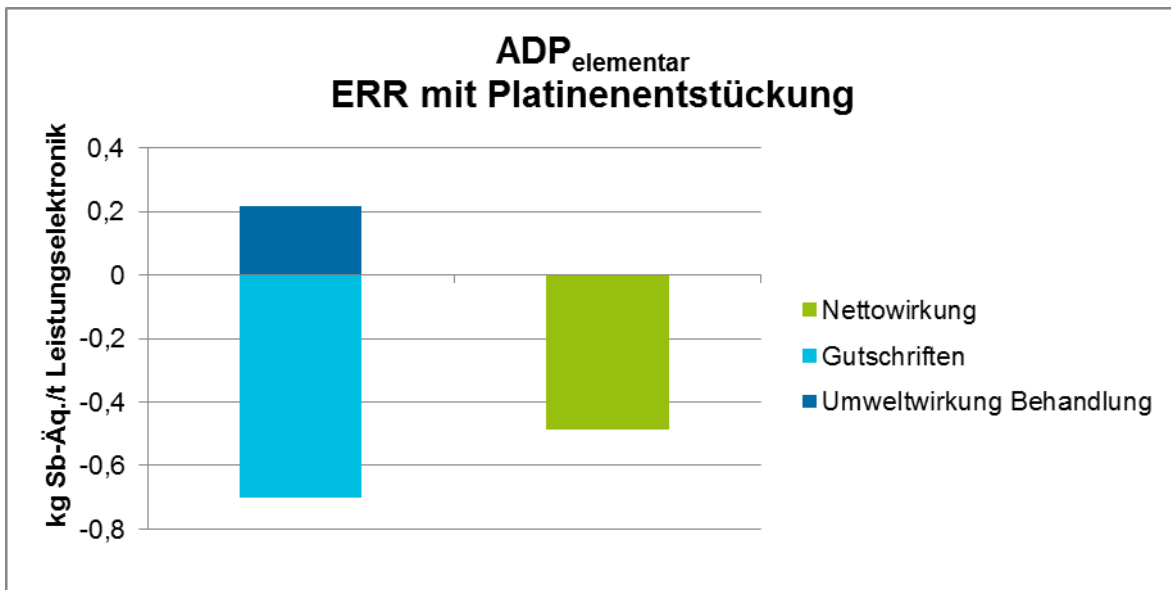
Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie photochemisches Oxidantienbildungspotenzial stammt vom Aluminium (87 %). Dieser Beitrag kommt vor allem vom vermiedenen hohen Strombedarf der Schmelzflusselektrolyse. Kupfer trägt mit 5 %, Stahl mit 3 % und Gold sowie Palladium jeweils mit 2 % zu den Gutschriften bei. Die übrigen Gutschriften sind vernachlässigbar. SO<sub>2</sub> liefert mit knapp 47 % den höchsten Beitrag, CO mit gut 20 % den zweithöchsten Beitrag von allen Emissionen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

Durch die chemische Platinentstückung kommt es zu einer Erhöhung der Gutschriften um 0,1 % oder 0,01 kg Ethen-Äquivalenten. 80 % der Erhöhung kommen vom Zinn 20 % vom Tantal.

**5.3.5. Elementarer Ressourcenverbrauch ( $ADP_{\text{elementar}}$ )**

Abbildung 5-49 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung für die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch dargestellt.

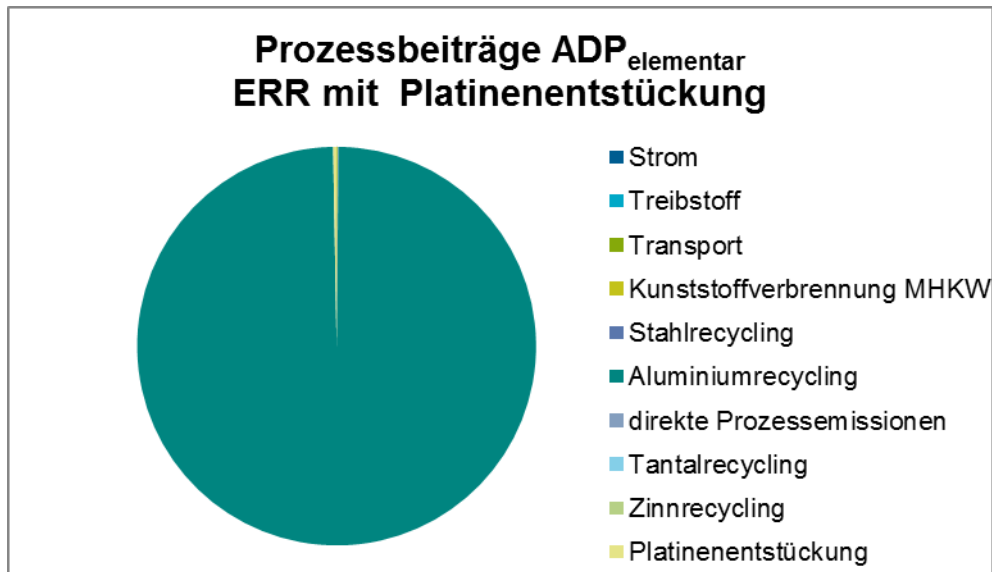
**Abbildung 5-49:  $ADP_{\text{elementar}}$ : Gesamtwirkung ERR mit chemischer Platinentstückung**



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung verursacht Emissionen in Höhe von 0,22 kg Sb-Äquivalenten, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 0,7 kg Sb-Äquivalente ein.

Abbildung 5-50 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

**Abbildung 5-50: ADP<sub>elementar</sub>: Anteile der Prozesse der ERR mit chemischer Platinentstückung an den Gesamtaufwendungen**

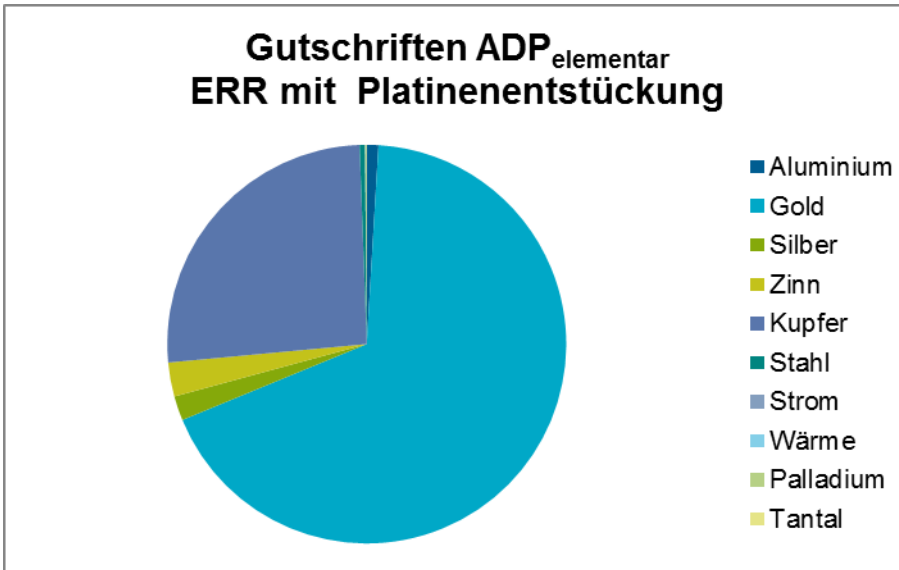


Der Hauptbeitrag der Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch mit fast 100 % stammt vom Aluminiumrecycling. Hier entstammt der Hauptteil vor allem aus der vermiedenen Bereitstellung von Ressourcen, die für das Aluminiumrecycling benötigt werden. Blei liefert mit knapp 50 % den höchsten Beitrag, Cadmium mit gut 34 % den zweithöchsten Beitrag von allen Ressourcen in dieser Kategorie. Diese beiden Metalle werden für die Bereitstellung des, für das Aluminiumrecycling notwendige, Zinks verbraucht.

Durch die chemische Platinentstückung kommt es zu einer Erhöhung der Aufwendungsemissionen von 0,5 % oder 0,001 kg Sb-Äquivalenten.

Abbildung 5-51 zeigt die Gutschriften für die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-51:  $ADP_{\text{elementar}}$ : Gutschriftenanteile für die ERR mit chemischer Platinentstückung**



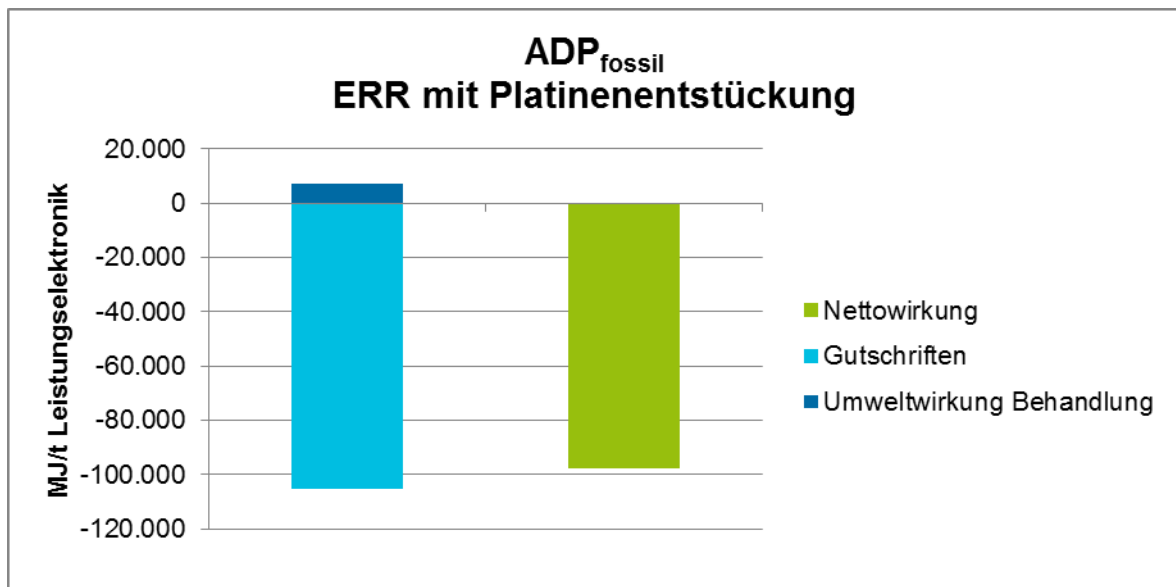
Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch stammt vom Gold (68 %). Auf Grund der geringen Reservenmenge (52 Sb-Äq./kg), hat das geringe Gewicht des Goldes dennoch diesen hohen Beitrag. Kupfer liefert einen Beitrag von 26 %. Die verbliebenen 6 % verteilen sich auf die übrigen Metalle. Gold liefert mit gut 66 % den höchsten Beitrag, Kupfer mit knapp 20 % den zweithöchsten Beitrag von allen Ressourcen für die Gutschriften in dieser Kategorie.

Durch die chemische Platinentstückung kommt es zu einer Erhöhung der Gutschriften um 0,9 % oder 0,006 kg Sb-Äquivalenten. Fast 100 % dieser Erhöhung gehen auf das Zinn zurück, Tantal hat nur einen Anteil <1 %.

### 5.3.6. Fossiler Ressourcenverbrauch ( $ADP_{fossil}$ )

Abbildung 5-52 zeigt auf der linken Seite die Umweltwirkungen der Behandlung sowie den Beitrag der Gutschriften zur Verminderung der Umweltwirkungen. Auf der rechten Seite ist die Nettowirkung der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung für die Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch dargestellt.

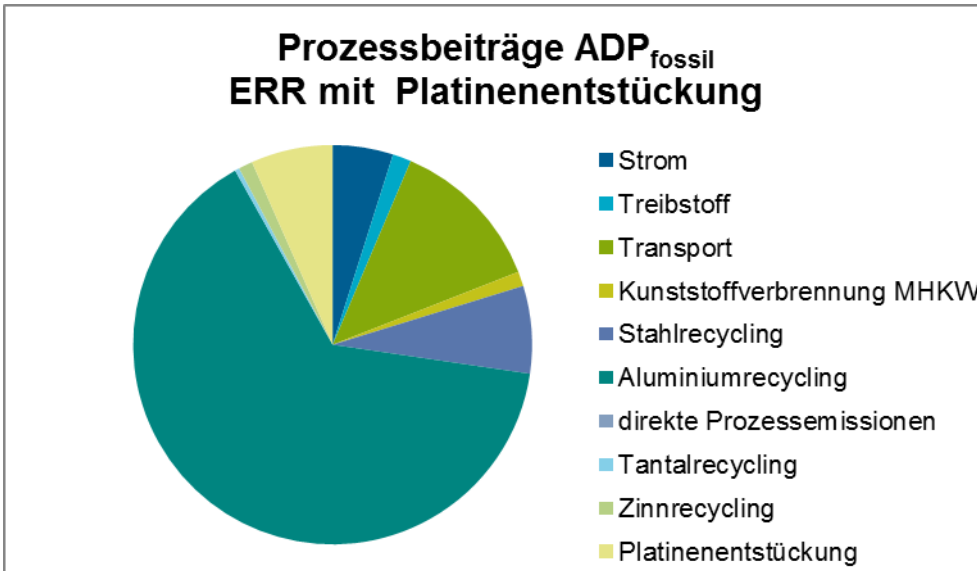
**Abbildung 5-52:  $ADP_{fossil}$ : Gesamtwirkung ERR mit chemischer Platinentstückung**



Die Behandlung einer Tonne Leistungselektronik über die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung verursacht Emissionen in Höhe von 7.260 MJ, spart aber durch die recycelten Metalle, den Strom und die Wärme 105.000 MJ ein.

Abbildung 5-53 zeigt die Umweltwirkungen der Aufwendungen der gesamten Recyclingkette für die Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinenentstückung aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der einzelnen Prozesse.

**Abbildung 5-53:  $ADP_{fossil}$ : Anteile der Prozesse der ERR mit chemischer Platinenentstückung an den Gesamtaufwendungen**



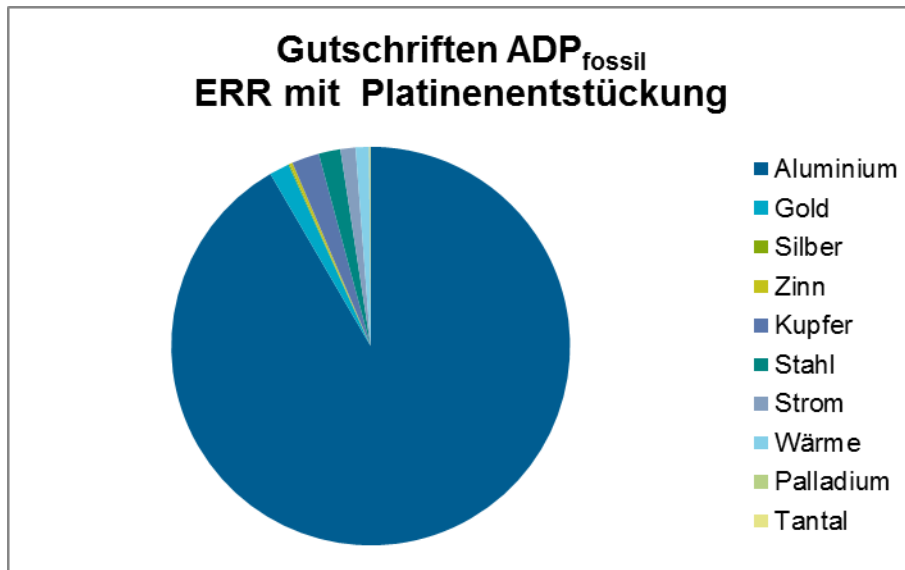
Der Hauptbeitrag der Aufwendungen in der Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch stammt vom Aluminiumrecycling (65 %), durch seinen hohen Energiebedarf. Der Transport (13 %), die Platinenentstückung (7 %) und das Stahlrecycling (7 %) liefern weitere große Beiträge. Die übrigen 8 % teilen sich auf die übrigen Prozesse auf. Erdgas liefert mit gut 42 % den höchsten Beitrag, Erdöl und Steinkohle mit jeweils einem Viertel die beiden weiteren wichtigen Beiträge von allen Energieträgern in dieser Kategorie.

Durch die chemische Platinenentstückung kommt es zu einer Erhöhung der Aufwendungsemissionen von 6,6 % oder 590 MJ.



Abbildung 5-54 zeigt die Gutschriften für die Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung aufgeschlüsselt nach den Beiträgen der recycelten Metalle sowie Strom und Wärme aus dem thermischen Kunststoffrecycling.

**Abbildung 5-54:  $ADP_{fossil}$ : Gutschriftenanteile für die ERR mit chemischer Platinentstückung**



Der größte Gutschriftenbeitrag der Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch stammt vom Aluminium (92 %). Dies geht auf den vermiedenen hohen Energiebedarf der Aluminiumgewinnung zurück. Die verbliebenen 8 % verteilen sich auf die übrigen Metalle. Steinkohle liefert mit gut 59 % den höchsten Beitrag, Erdgas mit knapp 21 % den zweitwichtigsten Beitrag von allen Energieträgern für die Gutschriften in dieser Kategorie.

Durch die chemische Platinentstückung kommt es zu keiner Erhöhung der Gutschriften.

### 5.3.7. Ökologische Bewertung der chemischen Platinenentückung

## 6. Die ökologische Bewertung der chemischen Platinenentückung wurde als Sensitivitätsanalyse diskutiert und ist in Kapitel 6.2.2.5 dargestellt. Auswertung

Das folgende Kapitel wertet die in Kapitel 4 und 5 dargestellten Ergebnisse aus. Hierzu werden zunächst Parameter und Annahmen, die die Ergebnisse der Ökobilanzen wesentlich beeinflussen, herausgearbeitet und diskutiert (Kapitel 6.1). Davon ausgehend wird die Relevanz der Aussagen der Ökobilanzen beurteilt: Hierfür erfolgt zunächst die Prüfung der Vollständigkeit (Kapitel 6.2.1), darauf folgend die Analyse der Beeinflussung des Ergebnisses durch variierte Einflussgrößen (Sensitivitätsanalysen, Kapitel 6.2.2) und eine Erörterung der Konsistenz der Ergebnisse (Kapitel 6.2.3). Abschließend geht Kapitel 6.3 zusammenfassend auf Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen ein, die sich aus den Ökobilanzen ergeben.

### 6.1. Identifizierung der signifikanten Parameter

In allen Wirkungskategorien zeigen die Gutschriften für die zurückgewonnenen Metalle (Aluminium, Eisen, Kupfer, Gold, Silber, Palladium, Zinn, Tantal) einen signifikanten Einfluss auf das Gesamtergebnis, welche in direkter Korrelation zu den Transferfaktoren steht. Dies gilt für jede einzelne der betrachteten Routen. Der Einfluss der Umweltlasten durch die Behandlung beträgt höchstens gut 10 % der Gutschriftenhöhe, außer für die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch. Hier ist der Anteil deutlich höher (rund  $\frac{3}{4}$  bei der Autoshredderroute und 30 % bei den Elektrorecyclingrouten). Da die Annahmen der Autoshredderroute und die Grundbehandlung der Elektrorecyclingrouten direkt aus der Praxis stammen ist eine praxisnahe Variation gering. Somit ist die Variation der Annahmen für die Behandlung von untergeordneter Rolle und würde zu vernachlässigbaren Veränderungen führen.

Ein wichtiger Parameter ist zudem der gewählte EoL-Allokationsansatz. Dieser sieht vor, dass die gebrauchte Leistungselektronik in die Bilanzierung als lastenfreier Input in das Recycling gehen, statt deren Herstellung zu bilanzieren und als Last dem Recycling aufzubürden. Da nach heutigem Stand praktisch noch kein Recycling von Leistungselektronik aus Elektrofahrzeugen in nennenswertem Umfang stattfindet, wurde von einer Sensitivitätsrechnung mit einer anderen Methode abgesehen, die andere Ansätze verwenden, um Recyclinggutschriften bei mehreren hintereinander geschalteten Lebens- und Verwertungszyklen angemessen zu berücksichtigen.

In der folgenden Tabelle sind für alle Routen die wichtigsten Prozesse mit den höchsten Gutschriftenbeiträgen sowie die zugehörigen Hauptemissionen/-ressourcen des jeweiligen Prozesses dargestellt.

Tabelle 6-1: Prozesse mit dem höchsten Gutschriftenbeitrag und zugehörige Hauptemissionen/-ressourcen für alle Routen und Kategorien

Wirkungskategorie	Recyclingroute	Metall mit dem höchsten Gutschriftenbeitrag	Hauptemission/-ressource des nebenstehenden Prozess
GWP	ASR	Aluminium (94 %)	CO <sub>2</sub> (87 %)
	ERR	Aluminium (93 %)	CO <sub>2</sub> (87 %)
	ERRmcPE	Aluminium (93 %)	CO <sub>2</sub> (87 %)
AP	ASR	Aluminium (92 %)	SO <sub>2</sub> (80 %)
	ERR	Aluminium (88 %)	SO <sub>2</sub> (80 %)
	ERRmcPE	Aluminium (88 %)	SO <sub>2</sub> (80 %)
EP	ASR	Kupfer (47 %)	Nitrat (43 %)
	ERR	Kupfer (38 %)	Nitrat (43 %)
	ERRmcPE	Kupfer (38 %)	Nitrat (43 %)
POCP	ASR	Aluminium (90 %)	SO <sub>2</sub> (48 %)
	ERR	Aluminium (87 %)	SO <sub>2</sub> (48 %)
	ERRmcPE	Aluminium (87 %)	SO <sub>2</sub> (48 %)
ADP <sub>elementar</sub>	ASR	Kupfer (60 %)	Kupfer (72 %)
	ERR	Gold (68 %)	Gold (96 %)
	ERRmcPE	Gold (68 %)	Gold (96 %)
ADP <sub>fossil</sub>	ASR	Aluminium (93 %)	Steinkohle (61 %)
	ERR	Aluminium (92 %)	Steinkohle (61 %)
	ERRmcPE	Aluminium (92 %)	Steinkohle (61 %)

AS: Autoshredderroute; ERR: Elektrorecyclingroute; ERRmcPE: Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinenentstückung

Es wird deutlich, dass die Aluminiumgutschrift, ebenso auch die Kupfer- und die Goldgutschriften, zu den signifikanten Parametern gehören. Dies bedeutet auch, dass die Zusammensetzung der Leistungselektronik zu den signifikanten Parametern gehört. Diese werden in der Sensitivitätsprüfung über eine Variation der Verluste in Aufbereitung und Verhüttung indirekt mitgeprüft. Diese Variation verändert die Gutschriftenhöhe ebenso wie es eine Variation der Zusammensetzung der Leistungselektronik tun würde.

## 6.2. Beurteilung

Um die Aussagekraft der erstellten Ökobilanzen zu prüfen, werden in den folgenden Abschnitten die Bilanzergebnisse nach den Kriterien Vollständigkeit, Sensitivität gegenüber der Variation von Einflussgrößen (siehe auch Kapitel 6.1) und Konsistenz untersucht und ausgewertet.

### 6.2.1. Vollständigkeitsprüfung

Für die vorliegende Ökobilanz wurden Daten zu allen für das Recycling der Leistungselektronik relevanten Prozessschritten erhoben. Alle Materialströme aus der Leistungselektronik wurden vollständig erfasst und über die beschriebenen Prozessschritte verfolgt. Für den Prozessschritt Ausbau und Zerlegung der Leistungselektronik ist die Datenlage als gut zu betrachten, da hier Praxisdaten vorliegen. Für den Prozessschritt Separation und Aufbereitung der einzelnen Fraktionen sind vereinzelt Labordaten bzw. Abschätzungen als Grundlage genommen worden, weshalb die Datenlage als befriedigend im Einzelfall als untersuchungsbedürftig angesehen werden kann. Für den Prozessschritt Recycling der einzelnen Fraktionen zur Rückgewinnung der Metalle liegen Daten in ecoinvent, sowie Praxisinformationen vor, weshalb auch hier die Datenlage als gut betrachtet werden kann.

Das in Kapitel 3.2.3 dargestellte Abschneidekriterium wurde bei der Entsorgung der sonstigen Abfälle angewandt. Dazu zählen z.B. die Komponenten, die nach Tabelle 4-3 unter Sonstiges fallen. Gleiches gilt für die Behandlung der abzuschneidenden Inhaltsstoffe aus der chemischen Platinentstückung.

### 6.2.2. Sensitivitätsprüfung

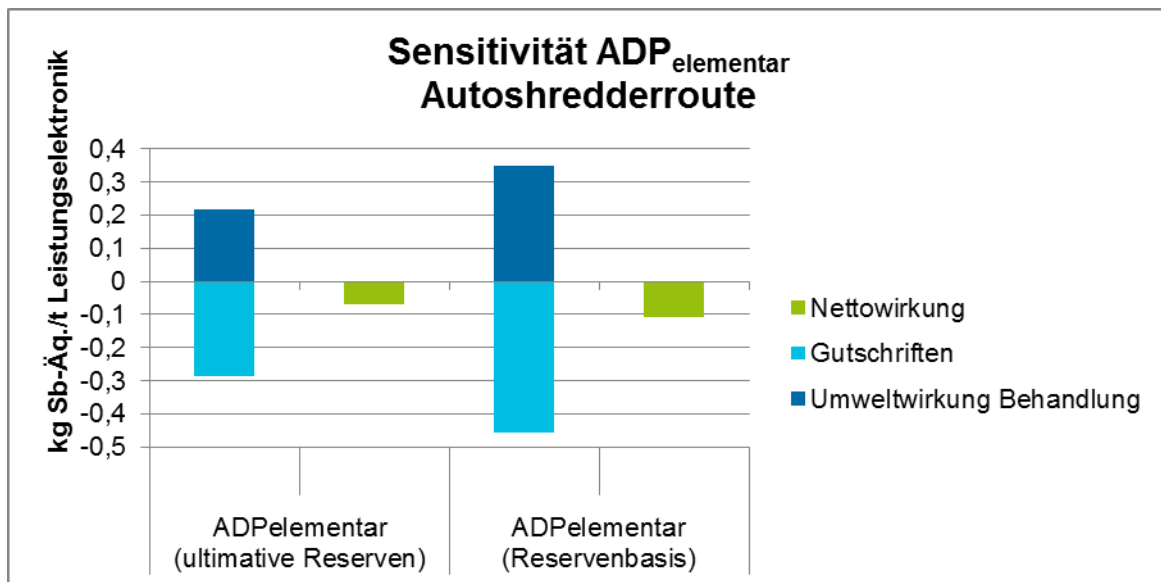
Im Folgenden wird die Sensitivität der Ergebnisse der Ökobilanz für die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch für die beiden unterschiedlichen Grundlagen ultimative Reserven (ultimate reserves) und Reservenbasis (reserve base) verglichen. Des Weiteren wird die Sensitivität der Ergebnisse der Ökobilanz gegenüber einer Variation der Verluste in Aufbereitung und Verhüttung untersucht. Die Bandbreiten der Platinenzusammensetzung, sowie die Minderung der Aluminiummenge in der Leistungselektronik werden ebenfalls betrachtet.

### 6.2.2.1. Vergleich der Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch

In den folgenden Abbildungen wird für jede Route das Ergebnis der Wirkungskategorie elementarer Ressourcenverbrauch auf Basis der ultimativen Reserven, welche bereits in Kapitel 5 gezeigt wurden, dem elementaren Ressourcenverbrauch auf Reservenbasis gegenübergestellt.

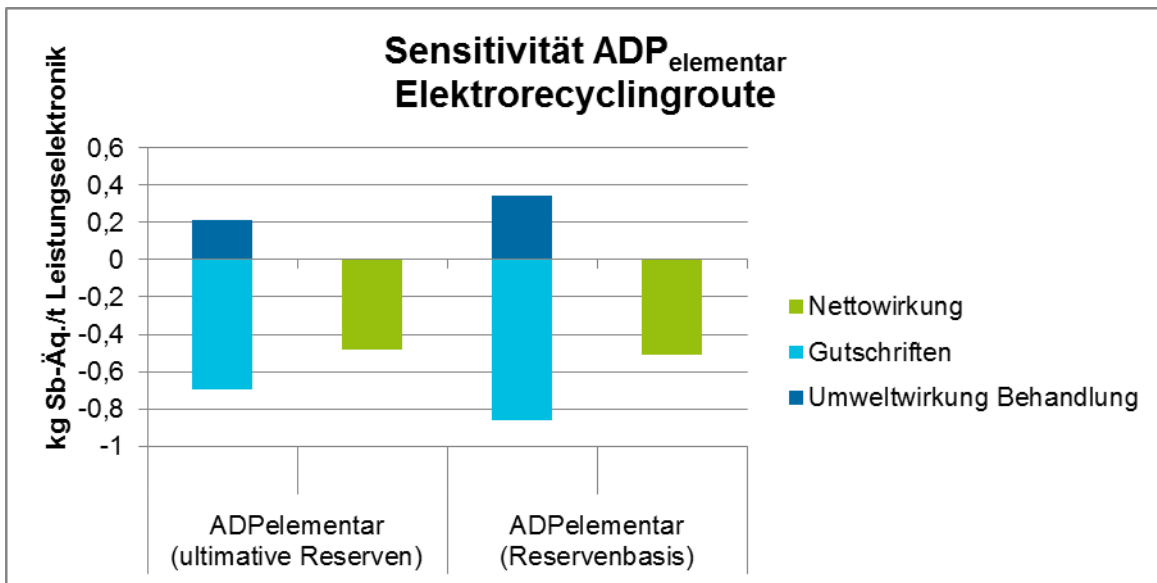
In Abbildung 6-1 ist zu sehen, dass sich durch die Nutzung der Reservenbasis als Berechnungsgrundlage sowohl die Umweltwirkungen der Behandlung als auch die Wirkung der Gutschriften vergrößert. Das Gesamtergebnis ändert sich hierdurch nicht, sondern wird noch verstärkt, dass ein Recycling der Leistungselektronik eine positive Wirkung auf die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch hat. Das Nettoergebnis verbessert sich im Fall der Autoshredderroute um rund 50 %.

Abbildung 6-1: Sensitivität  $ADP_{\text{elementar}}$ : Autoshredderroute



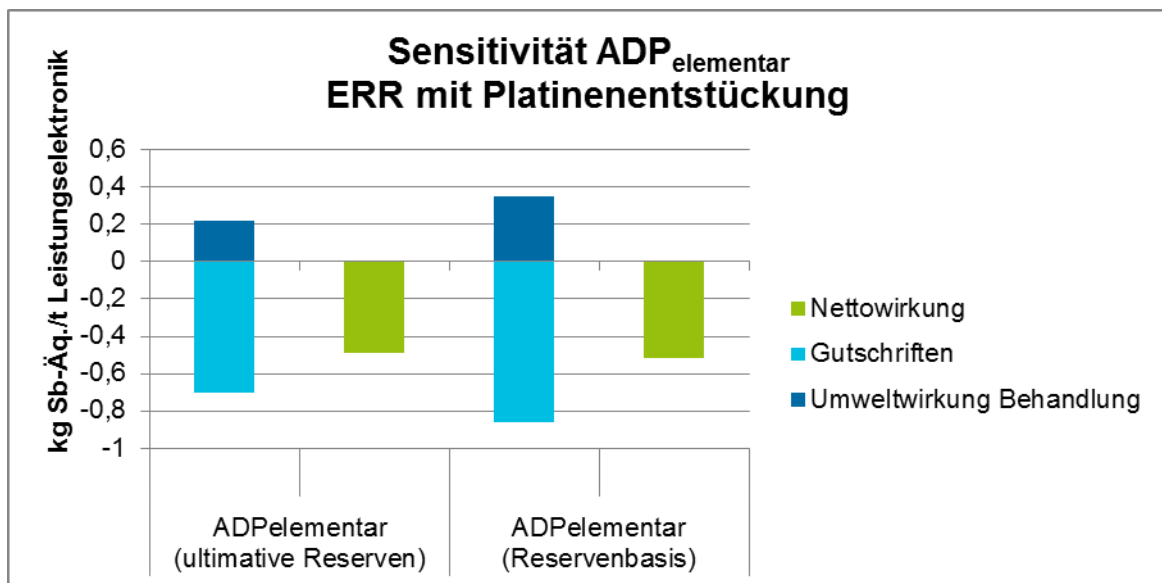
In Abbildung 6-2 ist zu sehen, dass sich durch die Nutzung der Reservenbasis als Berechnungsgrundlage sowohl die Umweltwirkungen der Behandlung als auch die Wirkung der Gutschriften vergrößert. Das Gesamtergebnis ändert sich hierdurch nicht, sondern wird noch verstärkt, dass ein Recycling der Leistungselektronik eine positive Wirkung auf die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch hat. Das Nettoergebnis verbessert sich im Fall der Elektrorecyclingroute um rund 6 %.

**Abbildung 6-2: Sensitivität  $ADP_{\text{elementar}}$ : Elektrorecyclingroute**



In Abbildung 6-3 ist zu sehen, dass sich durch die Nutzung der Reservenbasis als Berechnungsgrundlage sowohl die Umweltwirkungen der Behandlung als auch die Wirkung der Gutschriften vergrößert. Das Gesamtergebnis ändert sich hierdurch nicht, sondern wird noch verstärkt, dass ein Recycling der Leistungselektronik eine positive Wirkung auf die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch hat. Das Nettoergebnis verbessert sich im Fall der Elektrorecyclingroute um rund 6 %.

**Abbildung 6-3: Sensitivität ADP<sub>elementar</sub>: ERR mit chemischer Platinenentstückung**



Zusammenfassend zeigt diese Sensitivitätsanalyse, dass die Änderungen für die Routen Elektrorecycling mit und ohne chemische Platinenentstückung bei der Variation der Reservenbasis nur geringfügig sind. Die Aussage der positiven Wirkungen wird tendenziell bestärkt, wenn auch in geringerem Umfang. Im Falle der Autosshredderroute ist die Änderung deutlicher. Die relative Änderung in allen Routen liegt in der gleichen Größenordnung. Die Bezugsgröße für eine prozentuale Bewertung, das Nettoergebnis der Autosshredderroute, hat eine geringere Umweltentlastung und somit hat die Änderung eine deutlich höhere prozentuale Wirkung. Dennoch wird auch hier die Aussage bestätigt, dass die Behandlung unter den gewählten Prämissen eine Umweltentlastung zur Folge hat.

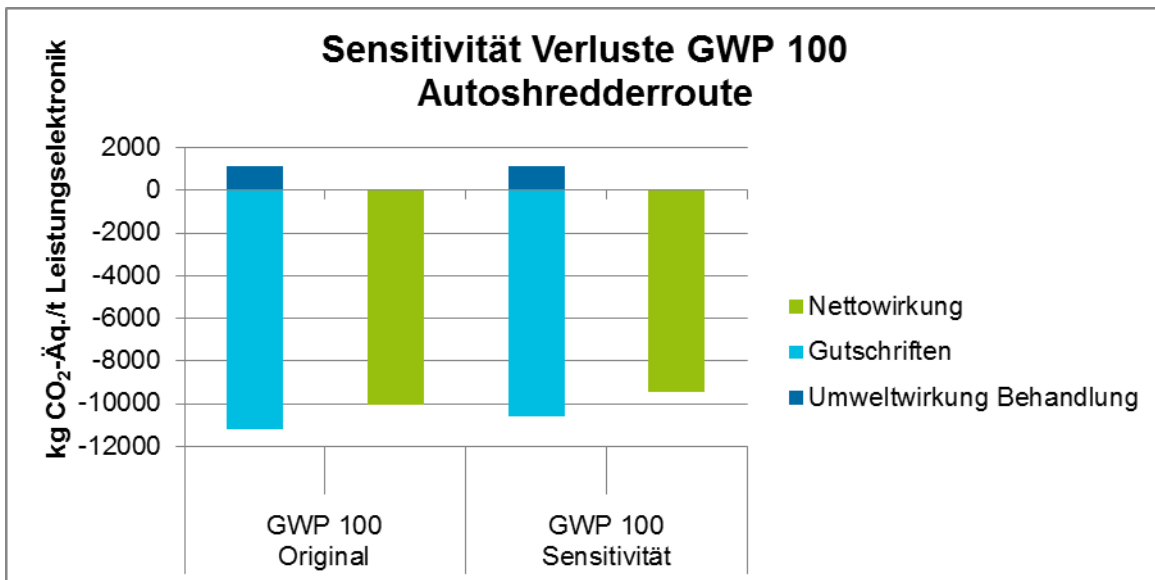
### 6.2.2.2. Erhöhung der Verluste in Aufbereitung und Verhüttung

Die zweite Sensitivitätsanalyse untersucht die Auswirkungen von höheren Verlusten in Aufbereitung und Verhüttung beim Metallrecycling. Hierbei werden die angenommenen Verluste für alle Metalle pauschal um 5 % erhöht. Im Falle der Massenmetalle Aluminium, Kupfer und Eisen ist diese Annahme sehr drastisch. In Anlagen nach heutigem Stand der Technik ist eine solche Reduktion der Transferfaktoren kaum zu erwarten, weil hier vielfach erprobte und robuste Technologien zum Einsatz kommen. Im Falle der Edel- und Sondermetalle besteht wie in vorhergehenden Kapiteln bereits aufgeführt eine viele höhere

Datenungenauigkeit. Bei Gold bedeutet eine Erhöhung der Verluste um 5 % im Falle der Autoschredderroute eine Senkung der Rückgewinnungsquote von 19 % auf 14 %, also eine Reduktion um ein Viertel. Dies liegt im Bereich des Möglichen. Auch ist es denkbar, dass bei den Elektrorecyclingrouten die Rückgewinnungsquote von Gold um 5 % absinkt (von 93 % auf 88 %).

In Abbildung 6-4 ist zu sehen, dass die Gutschriften der Metalle und damit die Nettowirkung des Recycling sinken. Dies geschieht im Rahmen der dargestellten 5 %, was bedeutet dass die Verluste und die Umweltwirkungen direkt proportional sind und nur eine massive Änderung deutliche Auswirkungen zeigen würde. Die Aussage der positiven Wirkung wird hierbei nicht verändert.

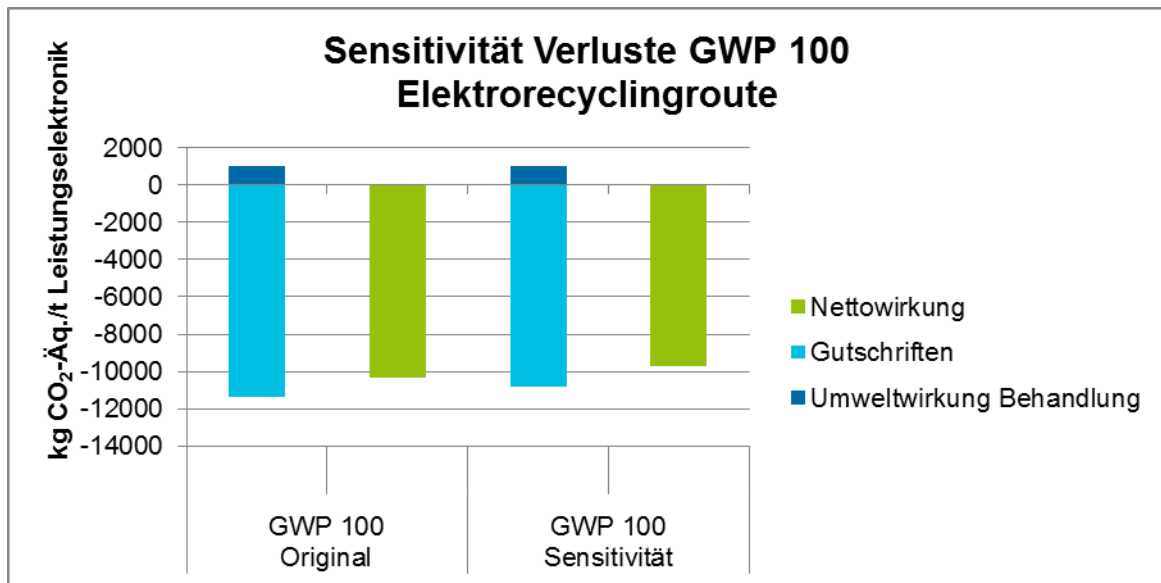
**Abbildung 6-4: Sensitivität Verluste in Aufbereitung und Verhüttung GWP 100: Autoschredderroute**





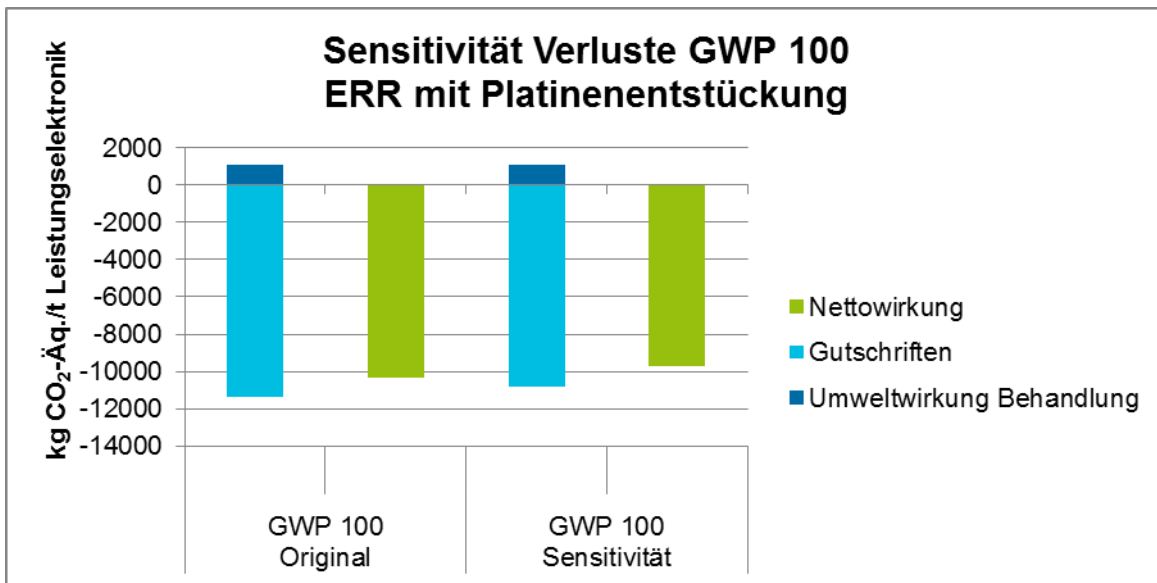
In Abbildung 6-5 ist zu sehen, dass die Gutschriften der Metalle und damit die Nettowirkung des Recycling sinken. Dies geschieht im Rahmen der dargestellten 5 %, was bedeutet dass die Verluste und die Umweltwirkungen direkt proportional sind und nur eine massive Änderung deutliche Auswirkungen zeigen würde. Die Aussage der positiven Wirkung wird hierbei nicht verändert.

**Abbildung 6-5: Sensitivität Verluste in Aufbereitung und Verhüttung GWP 100: Elektrorecyclingroute**



In Abbildung 6-6 ist zu sehen, dass die Gutschriften der Metalle und damit die Nettowirkung des Recycling sinken. Dies geschieht im Rahmen der dargestellten 5 %, was bedeutet dass die Verluste und die Umweltwirkungen direkt proportional sind und nur eine massive Änderung deutliche Auswirkungen zeigen würde. Die Aussage der positiven Wirkung wird hierbei nicht verändert.

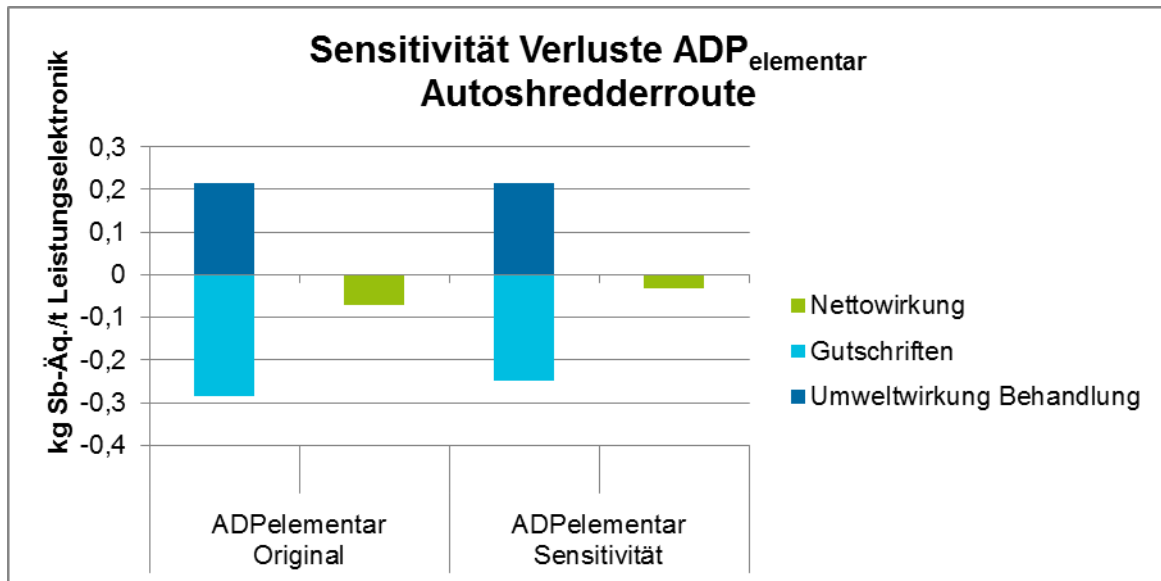
**Abbildung 6-6: Sensitivität Verluste in Aufbereitung und Verhüttung GWP 100: ERR mit chemischer Platinentstückung**



Für die Kategorie Klimaerwärmungspotenzial wird die Aussage der positiven Wirkung für keine der Routen geändert. Da für fast alle anderen Kategorien ähnliche Auswirkungen zu erwarten sind, wird nur die Kategorie elementarer Ressourcenverbrauch näher betrachtet. Da hier die Aussage der deutlich positiven Umweltwirkung nicht so stark ausgeprägt ist, wie bei den übrigen Kategorien, könnte hier eine Änderung die Aussage der positiven Wirkung verändern.

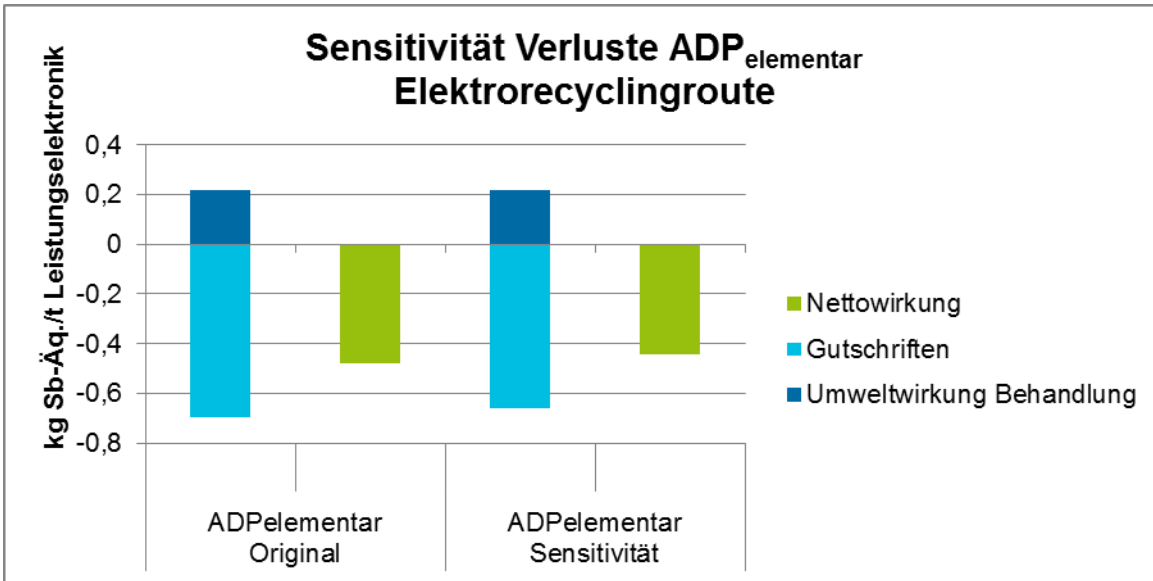
In Abbildung 6-7 ist zu sehen, dass die positive Nettowirkung der Autoshredderroute durch die 5 %-ige Änderung der Verluste sich mehr als halbiert. Hier ist die positive Wirkung nahe an der Null, aber eine Änderung der Aussage trifft nicht ein.

**Abbildung 6-7: Sensitivität Verluste in Aufbereitung und Verhüttung ADP<sub>elementar</sub>: Autoshredderroute**



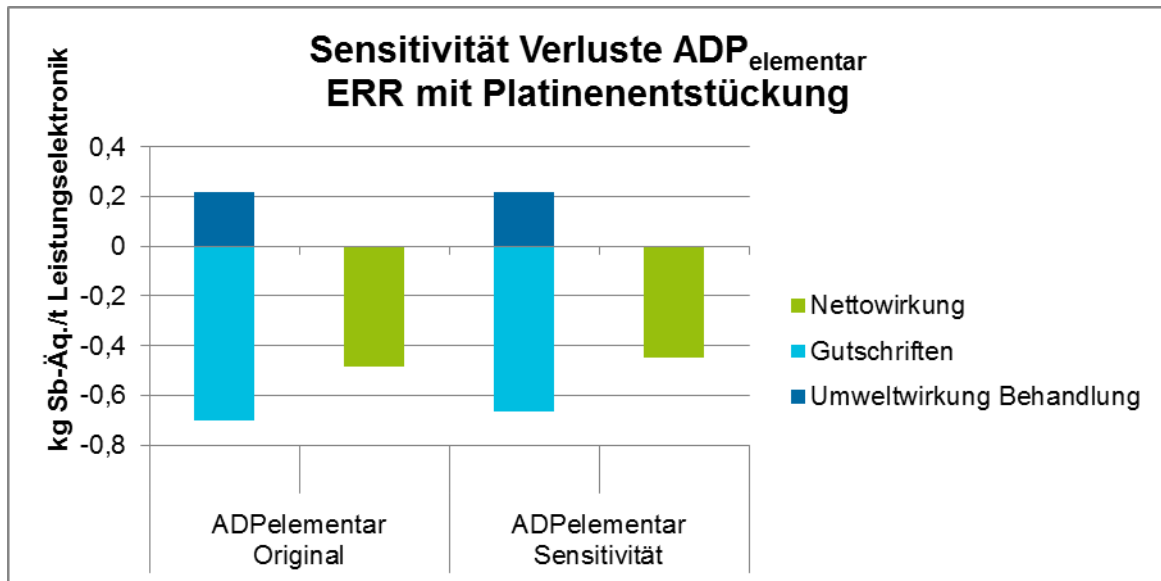
In Abbildung 6-8 ist zu sehen, dass die positive Nettowirkung bei der Elektrorecyclingroute geringfügig kleiner wird und damit keine nennenswerte Änderung des Ergebnisses zur Folge hat.

**Abbildung 6-8: Sensitivität Verluste in Aufbereitung und Verhüttung  $ADP_{\text{elementar}}$ : Elektrorecyclingroute**



In Abbildung 6-9 ist zu sehen, dass die positive Nettowirkung bei der Elektrorecyclingroute mit Platinenentstückung geringfügig kleiner wird und damit keine nennenswerte Änderung des Ergebnisses zur Folge hat.

**Abbildung 6-9: Sensitivität Verluste in Aufbereitung und Verhüttung ADP<sub>elementar</sub>: Autoshrredderroute**



Für alle drei Recyclingrouten ist innerhalb praxisnaher Änderungen der Verluste keine Änderung der Aussage zu erwarten.

### 6.2.2.3. Sensitivität der Platinezusammensetzung

In Tabelle 4-2 sind die Bandbreiten der Platinezusammensetzung für die einzelnen Elemente dargestellt. Dies wird in einer Sensitivität für die Kategorie ADP<sub>elementar</sub> untersucht. Da die Reduktion des Edel- und Sondermetallgehaltes keine Änderungen auf die Ergebnisse hätte, werden die Maximalwerte für die einzelnen Metalle angenommen und die Gutschriften entsprechend angepasst.

Für die Autoshrredderroute steigt die Gutschrift von 0,286 kg Sb-Äq. auf 0,458 kg Sb-Äq., was einen Anstieg von 60 % bedeutet. Dies führt zu einer deutlich positiveren Umweltwirkung, da sich die Nettowirkung von -0,07 kg Sb-Äq. auf -0,242 kg Sb-Äq. verbessert.

Für die Elektrorecyclingroute steigt die Gutschrift von 0,697 kg Sb-Äq. auf 1,48 kg Sb-Äq., was einen Anstieg von 112 % bedeutet. Die Nettowirkung wird deutlich verstärkt und verbessert sich von von -0,481 kg Sb-Äq. auf -1,264 kg Sb-Äq.

Für die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinenentstückung steigt die Gutschrift von 0,703 kg Sb-Äq. auf 1,49 kg Sb-Äq., was einen Anstieg von 119 % bedeutet. Die

Nettowirkung wird deutlich verstärkt und verbessert sich von von -0,486 kg Sb-Äq. auf -1,273 kg Sb-Äq.

Die Differenz zwischen den Routen wird auf Grund der geringeren Verluste in den Elektrozyclingrouten deutlicher, jedoch ändert sich die Grundaussage für diese Kategorie nicht.

**6.2.2.4. Sensitivität des Aluminiumgehalts**

In **Tabelle 6-1** wird deutlich, dass Aluminium die Umweltwirkungen maßgeblich beeinflusst. Um zu überprüfen, wie sich die Gutschriften ändern würden, wird der Massengehalt des Aluminiums innerhalb der Leistungselektronik auf den niedrigsten, in der Analyse der verschiedenen Leistungselektronik gefundenen Wert, gesenkt. Dies entspricht einer Senkung des Aluminiumgehalts von 58,1 % auf 50,1 %, was absolut (inkl. Rückgewinnungsverluste) einer Senkung von 65,3 kg Aluminium entspricht.

In **Tabelle 6-2** ist die prozentuale Veränderung der Gutschriften für die drei Behandlungsrouten dargestellt. Die höchste Veränderung ist in der Kategorie Klimaerwärmungspotenzial mit 11,8 % in der Autoschredderroute zu finden. Wenn dies mit den Anteilen in **Tabelle 6-1** verglichen wird, zeigt die Sensitivität, dass es zu keiner nennenswerten Veränderung der Anteile kommt. Die Wirkung des Aluminiums würde von beispielsweise 90 % auf 80 % sinken, würde aber immer noch die relevanten Kategorien dominieren. Eine Änderung der Gesamtaussage der Ökobilanzen ist ebenfalls auszuschließen.

**Tabelle 6-2: Abnahme der Gutschriften durch Minimierung des Aluminiumanteils**

<b>Wirkungskategorien</b>	<b>Differenz Autoschredder-route</b>	<b>Differenz Elektrozyc-lingroute</b>	<b>Differenz ERR mit chemischer Plati-nenentstückung</b>
Klimaerwärmungspotenzial (kg CO <sub>2</sub> -Äq.)	11,8 %	11,6 %	11,6 %
Versauerungspotenzial (kg SO <sub>2</sub> -Äq.)	11,4 %	10,9 %	10,9 %
Eutrophierungspotenzial (kg Phosphat-Äq.)	5,3 %	4,0 %	4,0 %
Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (kg Ethen-Äq.)	11,2 %	10,7 %	10,7 %
Elementarer Ressourcenverbrauch (kg Sb-Äq.)	0,3 %	0,1 %	0,1 %
Fossiler Ressourcenverbrauch (MJ)	11,5 %	11,2 %	11,2 %

#### **6.2.2.5. Chemische Platinentstückung**

In Tabelle 6-3 ist die Differenz für Aufwand, Gutschriften und Nettoumweltwirkungen der Elektrorecyclingroute ohne chemische Platinentstückung zur Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung dargestellt. Positive Zahlen weisen hier auf eine stärkere negative Umweltwirkung hin, während negative Zahlen eine Umweltentlastung anzeigen.

Es wird deutlich, dass die chemische Platinentstückung nur in der Wirkungskategorie elementarer Ressourcenverbrauch zu einer zahlenmäßigen Entlastung führt. Überhaupt wirkt sich Rückgewinnung von mehr Zinn und Tantal nur in den Kategorien POCP und ADP<sub>elementar</sub> aus, wie die negativen Zahlen in der Gutschrift zeigen. In allen anderen betrachteten Kategorien verschlechtert sich die Umweltwirkung nominell. Die Unterschiede sind insgesamt aber sehr gering und deshalb nicht unbedingt als signifikantes Ergebnis zu betrachten.

**Tabelle 6-3: Differenzen der chemischen Platinentstückung zur Elektrorecyclingroute über alle Wirkungskategorien**

Wirkungskategorien	Differenz Behandlungs- aufwand	Differenz Gutschriften	Differenz Nettowirkungen
Klimaerwärmungspotenzial (kg CO <sub>2</sub> -Äq.)	40 (+3,8 %)	0 (±0 %)	40 (+0,4 %)
Versauerungspotenzial (kg SO <sub>2</sub> -Äq.)	1,5 (+40,5 %)	0 (±0 %)	1,5 (+1,3 %)
Eutrophierungspotenzial (kg Phosphat-Äq.)	0,1 (+6,6 %)	0 (±0 %)	0,1 (+0,2 %)
Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (kg Ethen-Äq.)	0,072 (+22,1 %)	-0,01 (-0,1 %)	0,062 (+0,8 %)
Elementarer Ressourcenverbrauch (kg Sb-Äq.)	0,001 (+0,5 %)	-0,006 (-0,9 %)	-0,005 (-1 %)
Fossiler Ressourcenverbrauch (MJ)	590 (+6,6 %)	0 (±0%)	590 (+0,6 %)

### 6.2.3. Konsistenzprüfungen

In der Datengenerierung wird eine konsistente Vorgehensweise verfolgt. Die Datenabfrage erfolgt unter einheitlichen Bedingungen (konsistente Tabellenvorlage). Die erhaltenen Antworten weisen einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad auf. Das Projekt verbindet unterschiedliche Datenlieferanten mit unterschiedlichem Ansatz. So finden sich Daten aus der industriellen Praxis neben Daten aus Laborversuchen. Im Hinblick auf das Gesamtergebnis wird der Einfluss als gering eingeschätzt.



Alle Materialflüsse der Recyclingrouten können qualitativ gut nachverfolgt werden. Es wurden keine generischen Zwischenschritte modelliert, so dass ein konsistenter Zusammenhang hergestellt wurde. Dadurch kann ein konsistenter Datensatz qualitätsgesichert werden.

Für die Recyclingprozesse sichert die Gleichbehandlung der Gutschriften für recycelte Wertstoffe eine konsistente Methodik. So werden die Aufwände zur Sekundärmaterialherstellung immer mit einer 100 %-Gutschrift des Primärprozesses gegengerechnet.

Die Datenqualität der Vorketten wird dagegen als sehr unterschiedlich bewertet. Die Daten, insbesondere der Primärgewinnung der Metalle, weisen unterschiedliche Detailtiefen aus. Die Inkonsistenzen bei der Beschreibung der Primärförderung von Primärmetallen sind in der Quelle gekennzeichnet.

Eine Inkonsistenz ergibt sich auch aus dem vergleichsweise hohen Alter der Datensätze aus ecoinvent 3.1, sowie den Gutschriftenprozessen, welche u.a. durch das Alter teilweise nicht dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, wie es den selbst modellierten Prozessen entspricht. Die Gutschriften wären in diesem Fall etwas kleiner, jedoch können die Ergebnisse hierdurch nicht maßgeblich verändert werden.

Die Charakterisierungsfaktoren für die Umweltwirkungen (GWP, AP,  $ADP_{\text{elem.}}$ , POCP und EP) sind einer einheitlichen Quelle entnommen [CML 2015].

### 6.3. Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen

Die Gesamtauswertung der Ökobilanzergebnisse zeigt auf Basis der gewählten Prämissen für alle untersuchten Routen für das Recycling der Leistungselektronik für alle untersuchten Wirkungskategorien, d. h. Treibhauspotenzial (GWP), fossiler Ressourcenverbrauch ( $ADP_{\text{fossil}}$ ), Versauerungspotenzial (AP), Verbrauch an abiotischen Ressourcen ( $ADP_{\text{elementar}}$ ), Eutrophierung (EP) und Bildung von Photooxidantien (POCP), durchgehend deutliche Nettogutschriften. Zu diesem Ergebnis tragen vor allem die Gutschriften für die recycelten Metalle bei. Die Umweltwirkungen der Behandlung haben für fast alle Kategorien wenig Einfluss.

Die hohen Rückgewinnungsraten der Massenmetalle Aluminium und Kupfer aus dem Recycling der Leistungselektronik tragen wesentlich zum guten Gesamtergebnis der Ökobilanz bei. Gold hat im Falle der Elektrorecyclingroute mit und ohne chemische Platinenentstückung ebenfalls einen wesentlichen Beitrag auf das positive Gesamtergebnis.

Dies lässt eindeutig die Bewertung zu, dass ein möglichst vollständiger Transfer der Metalle zurück in den Kreislauf die positiven Umweltwirkungen bedingt. Die Platinen sind nicht zuletzt aufgrund ihrer wertvollen Edelmetalle (Gold, Silber, Palladium) wichtig und interessant für die Ressourcenschonung und die Recyclingwirtschaft. Positiv ist hervorzuheben, dass die entsprechenden Recyclingverfahren (Aluminiumrecycling, Kupferrecycling, Leiterplattenrecycling, Stahlrecycling usw.) auf bereits bewährten und etablierten Infrastrukturen fußen und daher hier kein Entwicklungsaufwand notwendig ist.

## Sensitivitätsanalysen

Die Ergebnisse der zwei Sensitivitätsrechnungen (Variation der Charakterisierungsfaktoren in der Wirkungskategorie  $ADP_{\text{elementar}}$ ; Reduktion der Transferfaktoren) unterstützen den Befund der Relevanz der Recyclinggutschriften. Die Gutschriften für Aluminium, Kupfer und Gold haben hier den höchsten Beitrag. Die Ergebnisse haben sich in den Sensitivitätsanalysen als robust erwiesen.

## Einschränkungen

Hier muss an dieser Stelle auf die Systemgrenzen der vorliegenden Ökobilanz hingewiesen werden. Es wird weder die Herstellung der Leistungselektronik (und damit die Herstellung der entsprechenden Metalle und Bauteile mit ihren Vorketten) noch die Nutzungsphase der Leistungselektronik im entsprechenden Fahrzeug bilanziert. Gerade das Leichtbaumaterial Aluminium (hier für das gewichtsrelevante Gehäuse der Leistungselektronik genutzt) wäre für eine Bilanzierung der Nutzungsphase im Vergleich zu einer Leistungselektronik mit einem Edelstahlgehäuse von Interesse. Aussagen hierzu können jedoch im Rahmen dieser Ökobilanz aufgrund der gesetzten Systemgrenzen nicht getroffen werden.

Die Ökobilanzergebnisse zu den betrachteten Recyclingrouten müssen unter dem Vorbehalt bewertet werden, dass die Sachbilanzdaten teilweise auf Einzel- und Laborversuchen beruhen. Schließlich ist hervorzuheben, dass die Ergebnisse dieser Ökobilanz für das Recycling der Leistungselektronik nach den betrachteten Routen nicht mit den Ökobilanzergebnissen anderer Verfahren verglichen werden können. Es wurde in diesem Sinne keine vergleichende Ökobilanz durchgeführt. Weiterhin gelten alle Ergebnisse unter der Prämisse, dass die zu recycelnde Leistungselektronik keine Umweltlast trägt.

## Fazit und Empfehlungen

Für das Recycling der untersuchten Leistungselektronik über die drei dargestellten Routen ergeben die Ökobilanzergebnisse für alle Wirkungskategorien deutliche Nettogutschriften. Hier spielen vor allem das Recycling des Aluminiums, des Kupfers sowie des Goldes eine wichtige Rolle, da diese in verschiedenen Kategorien deutlich positive Auswirkungen haben.

Für die erste Route, die Autoshredderroute, zeigen die Ökobilanzergebnisse, dass bei Anwendung des heutigen Stands der Technik in allen Wirkungskategorien bereits deutliche Nettogutschriften erzielt werden können. Dieses Ergebnis beruht vor allem auf hohen Rückgewinnungsquoten für die die Massenmetalle Aluminium, Eisen und Kupfer, die durch eine hochwertige Sortiertechnik beim Autoschredder- und dem Postschredderbetrieb ermöglicht werden.

Für die Route 2a, die Elektrorecyclingroute, ergeben sich ebenfalls hohe Nettogutschriften für alle Wirkungskategorien. Dieses positive Ergebnis wird im Wesentlichen durch eine optimierte mechanische Aufbereitung mit der Prallmühle und nachfolgenden Aufbereitungsschritten ermöglicht, die zu vergleichbar hohen Rückgewinnungsquoten bei den Massenmetallen Aluminium, Eisen und Kupfer wie beim Autoschredder führt. Beim Kupfer wird darüber hinaus davon ausgegangen, dass die auf Elektronik optimierte Aufbereitungstechnik auch kleinteilige Bestandteile in der Elektronik vermehrt rückgewinnen kann. Aber auch die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium werden hier mit hohen

Verwertungsquoten wiedergewonnen. Ökobilanziell wirkt sich das Edelmetallrecycling in keiner signifikanten Weise aus. Lediglich das erhöhte Recycling von Gold schlägt sich in der Bilanz in den Wirkungskategorien ‚elementarer Ressourcenverbrauch‘ und ‚Eutrophierungspotenzial‘ nieder. Für einen relevanten Anteil in anderen Wirkungskategorien ist der Massenanteil der Edelmetalle an der gesamten Leistungselektronik inkl. Gehäuse zu gering.

Die Route 2b, die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung, ergänzt die Route 2a um eine chemische Platinentstückung mit einer nachfolgenden Verwertung der Tantalcondensatoren. Die Ergebnisse sind weitgehend identisch mit den Ergebnissen der zweiten Route, da sich die Sachbilanz im Wesentlichen nur durch den zusätzlichen Aufwand der chemischen Platinentstückung und die zusätzliche Gutschrift aus der Tantalverwertung unterscheidet. Da die Tantalmenngen in der Leistungselektronik sehr klein sind, schlagen sich die Tantalgutschriften nicht nennenswert in der Bilanz nieder. Gleiches gilt für die eingesetzten Chemikalien für die chemische Platinentstückung, die im Vergleich zum energieintensiven Aluminiumrecycling nur eine untergeordnete Relevanz haben. Auch wenn die Daten für die chemische Platinentstückung aus Laborversuchen hergeleitet wurden und eine entsprechende Datenunsicherheit besteht, kann aus der Ökobilanz bereits abgeleitet werden, dass von einer chemischen Platinentstückung keine relevanten ökologischen Vorteile zu erwarten sind. Denn den Vorteilen einer zusätzlichen Tantalrückgewinnung stehen entsprechende Aufwendungen für die eingesetzten Lösemittel gegenüber.

Die Ökobilanz hat gezeigt, dass die Autosredderroute mit hochwertiger Technik im Shredder und Postshredder in allen Wirkungskategorien zu deutlichen Umweltentlastungen führt. Es ist deshalb eine wichtige Aufgabe von Politik und Industrie, sicherzustellen, dass diese Technik flächendeckend zum Einsatz kommt.

Die Komplementierung der Elektronikrecyclingroute mit einer chemischen Platinentstückung ist nach derzeitigem Stand nicht zu empfehlen. Dem zusätzlichen Recycling des Tantals und der erhöhten Rückgewinnungsquote für Zinn stehen unverhältnismäßig hohe Aufwendungen an Chemikalien gegenüber, sowie ein höherer Energieaufwand sowie hohe Emissionen durch die notwendige Röstung des Zinns. Dies schlägt sich vor allem in den Kategorien Versauerungspotenzial und Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial nieder.

## 7. Literatur

- AG Fernwärme 2014 Hauptbericht der AG Fernwärme 2014; <https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht/>, 2014.
- Allacker 2014 Allacker, K.; Mathieux, F.; Manfredi, S.; Pelletier, N.; De Camillis, C.; Ardente, F. u.a.: Allocation solutions for secondary material production and end of life recovery: proposals for product policy initiatives. *Resour. Conserv. Recycl.* 88 (2014), S. 1–12.
- Buchert 2011a Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C.; Schüler, D.: Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBRi. Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren. Öko-Institut, Darmstadt, 2011.
- Buchert 2011b Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C., Schüler, D.: Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec I). Öko-Institut, Darmstadt, 2011.
- Buchert 2015a Buchert, M.; Sutter, W.: Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien. Öko-Institut, Darmstadt, 2015.
- Buchert 2015b Buchert, M.; Sutter, W.: Ökobilanzen zum Recyclingverfahren EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien. Öko-Institut, Darmstadt, 2015.
- CML 2001 Life cycle assessment. An operational guide to the ISO standard; Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, 2001.
- CML 2002 van Oers, L.; de Koning, A.; Guinée, J.B.; Huppes, G.: Abiotic resource depletion in LCA – Improving characterization factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook. DWW report, 2002.
- CML 2015 Database CML-IA v4.4, Institute of Environmental Sciences, Leiden University, Leiden; <http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>, January 2015.
- ecoinvent v3.1 Ökobilanz-Datenbank ecoinvent v3.1; <http://www.ecoinvent.org>; integriert in GaBi v6.0, 2014.
- EC 2013 European Commission: Commission Recommendation on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of the products and organizations. Annex II: Product Environmental Footprint (PEF) Guide to Commission Recommendation on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of the products and organizations. Official Journal of the European Union Volume 56, L 124, 4.5.2013.
- EC 2014 European Commission: Environmental Footprint Pilot Guidance document, - Guidance for the implementation of the EU Product Environmental Footprint (PEF) during the Environmental Footprint (EF) pilot phase, v. 4.0, May 2014.
- Ekvall 1997 Ekvall, T.; Tillman, A. M.: Open-loop recycling: criteria for allocation procedures. *International Journal of Life Cycle Assessment* 2 (1997), S. 155-162.

- Finnveden 2009 Finnveden, G.; Hauschild, M.; Ekvall, T.; Guinee, J.; Heijungs, R.; Hellweg, S.; Koehler, A.; Pennington, D.; Suh, S.: Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management* 91 (2009), S. 1–21.
- Frischknecht 2010 Frischknecht, R.: LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. *International Journal of Life Cycle Assessment* 15 (2010), S. 666–671.
- Grehl 2012 Grehl, M.; Hagelüken, C.; von Weizsäcker, E. U.: Recycling and Loop Concept for a Sustainable Usage. In: *Precious Materials Handbook*. Hanau 2012, S. 36 – 79.
- Neugebauer 2012 Neugebauer, S.; Finkbeiner, M.: Ökobilanz nach ISO 14040/44 für das Multirecycling von Stahl. Studie im Auftrag der Wirtschaftsvereinigung Stahl / Stahlinstitut VDEh. Düsseldorf 2012; [http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/120621\\_Finkbeiner\\_Multi-Recycling\\_von\\_Stahl.pdf](http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/120621_Finkbeiner_Multi-Recycling_von_Stahl.pdf)
- Goedkoop 1999 Goedkoop, M.; Spriensma, R.S.: *The Eco-indicator 99, a Damage oriented method for LCIA*, Ministry VROM, the Hague 1999.
- Goedkoop 2009 Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; de Schryver, A.; Struijs, J.; van Zelm, R.: *ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition. Report 1: characterization*, 2009.
- Guinée 2001 Guinée, J.B.; de Bruijn, H.; van Duin, R.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.A.J.; Huppes, G.; Kleijn, R.; de Koning, A.; van Oers, L.; Sleeswijk, A.W.; Suh, S.; de Haes, H.A.U.: *Life cycle assessment – an operational guide to the ISO standards, part 2b*. Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden, 2001.
- Guinée 2002 Guinée, J.B. (Ed.); Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Wegener Sleeswijk, A.; de Haes, H.A.U.; de Bruijn, J.A.; van Duin, R.; Huijbregts, M.A.J.: *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (<http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/index.html>), 2002.
- Hauschild 1998 Hauschild, M.Z.; Wenzel, H.: *Environmental assessment of products. Vol. 2 - Scientific background*, 565 pp. Chapman & Hall, United Kingdom, ISBN 0412 80810 2, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA, USA, 1998.
- Hauschild 2008 Hauschild, M.; Huijbregts, M.; Jolliet, O.; Margni, M.; MacLeod, M.; van de Meent, D.; Rosenbaum, R.K.; McKone, T.: *Building a model based on scientific consensus for Life Cycle Impact: Assessment of Chemicals: the Search for Harmony and Parsimony*. *Environmental Science and Technology* 42(19), 7032-7036 (<http://dx.doi.org/10.1021/es703145t>), 2008.
- Humbert 2012 Humbert, S.; De Schryver, A.; Bengoa, X.; Margni, M.; Jolliet, O.: *IMPACT 2002+ User Guide: Draft for version Q2.21*, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2012.

ILCD 2010 ILCD-Handbook: General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance; European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability; 1<sup>st</sup> Edition, 2010.

IPCC 2013 Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA], 2013.

ISO 2013 ISO/TS 14067:2013 Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification and communication, May 2013.

Kim 1997 Kim, S.; Hwang, T.; Lee, K.M.: Allocation for Cascade Recycling System. *International Journal of Life Cycle Assessment* 2 (1997), S. 217–222.

Klöpffer 1996 Klöpffer, W.: Allocation rule for open-loop recycling in life cycle assessment - a review. *International Journal of Life Cycle Assessment* 1 (1996), S. 27-31.

Klöpffer 2009 Klöpffer, W.; Grahl, B.: *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*; Wiley-VCH, Weinheim, 2009.

Lehmann 2015 Lehmann, A., Bach, V., Finkbeiner, M.: Product environmental footprint in policy and market decisions: Applicability and impact assessment. In: *Integrated Environmental Assessment and Management* 2015 Vol: 11 (3) :417-424. doi: 10.1002/ieam.1658, 2015.

Rosenbaum 2008 Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.K.; Gold, L.S.; Huijbregts, M.A.J.; Jolliet, O.; Juraske, R.; Koehler, A.; Larsen, H.F.; MacLeod, M.; Margni, M.; McKone, T.E.; Payet, J.; Schuhmacher, M.; Van de Meent, D.; Hauschild, M.Z.: USEtox - The UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment* 13(7) 532-546 (<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>), 2008.

Rosenbaum 2011 Rosenbaum, R.K.; Huijbregts, M.A.J.; Henderson, A.; Margni, M.; McKone, T.E.; Van de Meent, D.; Hauschild, M.; Shaked, S.; Li, D.S.; Slone, T.H.; Gold, L.S.; Jolliet, O.: USEtox human exposure and toxicity factors for comparative assessment of chemical emissions in Life Cycle Analysis: Sensitivity to key chemical properties. *International Journal of Life Cycle Assessment* Special issue USEtox, July 2011.

Schmid 2006 Schmid, J.; Hornberger, M.; Janusz-Renault, G.: Gefährdungspotenzial durch Cyclopentan aus der Behandlung von VOC-Kühlgeräten. Im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg, 2006.

Siemens 2014 Siemens AG; Daimler AG; Öko-Institut e. V.; Umicore AG & Co. KG; Vacuumschmelze GmbH; Universität Erlangen-Tübingen; TU Clausthal; Fraunhofer Gesellschaft, Institut für System- und Innovationsforschung (ISI): *Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtriebwerken – Motor Recycling (MORE)*. Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über Forschungszentrum Jülich, 2014.

- Steen 1999 Steen B. (1999) A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS) Version 2000 - Models and Data of the Default Method CPM report 1999:5.
- UBA 1995 Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen – Wirkungsbilanz und Bewertung. Umweltbundesamt; Gesellschaft für Consulting und Analytik im Umweltbereich (C.A.U.); ifeu. Umweltbundesamt Texte, 23/95, 1995.
- UBA 2002 Ökobilanzen für Getränkeverpackungen II/Phase 2, ifeu. Umweltbundesamt Texte 51/02, Berlin 2002.
- Vogtlander 2001 Vogtlander, J.G.; Brezet, H.C.; Hendriks, C. F.: Allocation in recycling systems - An integrated model for the analyses of environmental impact and market value. International Journal of Life Cycle Assessment 6 (2001), S. 344-355.





## Annex 1: Verwendete generische Datensätze

**Tabelle A-1: Für die Ökobilanz verwendete generische Datensätze**

Schritt	Datensatz	Herkunft
Werkstoffrecycling	RER: treatment of aluminium scrap, new, at refiner	ecoinvent v3.1
	RER: steel production, electric, low-alloyed	ecoinvent v3.1
Gutschriften für Metalle	GLO: aluminium ingot, primary, to aluminium, cast alloy market	ecoinvent v3.1
	RER: steel production, converter, low-alloyed	ecoinvent v3.1
	RER: copper production, primary	ecoinvent v3.1
	GLO: market for gold	ecoinvent v3.1
	GLO: market for silver	ecoinvent v3.1
	GLO: market for tin	ecoinvent v3.1/2.1*
	GLO: market for palladium	ecoinvent v3.1
Energie	GLO: tantalum production, powder, capacitor-grade	ecoinvent v3.1/2.1*
	DE: market for electricity, high voltage	ecoinvent v3.1
	Europe w/o Switzerland: market for heat, district or industrial, other than natural gas	ecoinvent v3.1
	Europe w/o Switzerland: market for heat, district or industrial, natural gas	ecoinvent v3.1

	Europe w/o Switzerland: heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW	ecoinvent v3.1
	GLO: Diesel, in Baumaschine	ecoinvent v3.1
	CN: market for electricity, medium voltage	ecoinvent v3.1
	RoW: market for electricity, medium voltage	ecoinvent v3.1
Hilfsstoffe und Infrastruktur	GLO: market for mine infrastructure, open cast, non-ferrous metal	ecoinvent v3.1
	GLO: market for conveyor belt	ecoinvent v3.1
	Europe w/o Switzerland: market for light fuel oil	ecoinvent v3.1
	GLO: market for electrode, negative, LiC6	ecoinvent v3.1
	GLO: market for limestone, crushed, washed	ecoinvent v3.1
	WEU: market for hard coal	ecoinvent v3.1
	GLO: market for gypsum, mineral	ecoinvent v3.1
	GLO: market for sodium hydrosulfide	ecoinvent v3.1
	RER: hydrogen peroxide production, product in 50 % solution state	ecoinvent v3.1
	GLO: market for iron scrap, sorted, pressed	ecoinvent v3.1
	RER: market for hydrochloric acid, without water, in 30 % solution state	ecoinvent v3.1
Entsorgung	CH: treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration	ecoinvent v3.1

Transport/Maschinen	GLO: transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	ecoinvent v3.1
	RER: transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3	ecoinvent v3.1
	GLO: transport, freight, sea, transoceanic ship	ecoinvent v3.1

\*Die Erzgewinnung von Tantal und Zinn wurde mit den dargestellten Prozessen aus ecoinvent 3.1 auf Basis von Daten der ecoinvent 2.1 Dokumentation (Report 10) nachmodelliert. In Kapitel 3.2.3 ist dies näher erläutert.

## **Annex 2: Externes kritisches Gutachten**

## **Kritische Prüfung der Studie**

# **ÖKOBILANZ ELEKTROFAHRZEUGRECYCLING 2020 – SCHLÜSSELKOMPONENTE LEISTUNGSELEKTRONIK**

- Auftraggeber:** Öko-Institut e.V.  
Darmstadt  
mit Förderung durch das  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit, Berlin
- Prüfer:** Prof. Dr. Matthias Finkbeiner, Berlin
- Normbezug:** DIN EN SO 14040 (2006):  
Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze  
und Rahmenbedingungen  
DIN EN ISO 14044 (2006):  
Umweltmanagement – Ökobilanz –  
Anforderungen und Anleitungen  
ISO TS 14071 (2014):  
Environmental management - Life cycle  
assessment - Critical review processes and  
reviewer competencies: Additional  
requirements and guidelines to ISO  
14044:2006

## **Inhalt und Umfang der Kritischen Prüfung**

Der Prüfer und das Prüfungsverfahren sollen feststellen, ob:

- die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden mit den internationalen Normen ISO 14040 und ISO 14044 übereinstimmen;
- die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden wissenschaftlich begründet und technisch gültig sind;
- die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmäßig sind;
- die Auswertungen die erkannten Einschränkungen und das Ziel der Studie berücksichtigen und
- der Bericht transparent und in sich stimmig ist.

Die Kritische Prüfung wurde gemäß Abschnitt 6.2 der ISO 14044 als Prüfung durch einen externen, unabhängigen Sachverständigen vorgenommen, da diese Ökobilanz-Studie nicht als Grundlage für zur Veröffentlichung vorgesehene vergleichende Aussagen bestimmt ist. Dieser Prüfungsbericht gilt ausschließlich für den Abschlußbericht der Studie in der am 07.02.2017 vorgelegten Fassung.

Die Prüfung und Verifizierung einzelner Daten und Datensätze war nicht Teil des Untersuchungsumfanges.

## **Prüfungsverfahren**

Das Prüfungsverfahren wurde zwischen dem Öko-Institut als Ersteller der Ökobilanz und dem externen Sachverständigen koordiniert. Das Prüfungsverfahren fand parallel zur Durchführung der Ökobilanz statt. Das Auftakttreffen mit dem Öko-Institut fand am 17. Februar 2016 in Berlin statt. Neben ersten Festlegungen zu Ziel und Untersuchungsrahmen wurden auch der Umfang und der Prozess der Kritischen Prüfung festgelegt. Das zweite Treffen wurde mit dem Öko-Institut und der gesamten Projektgruppe bei Elektrocycling GmbH in Goslar am 20. Juni 2016 durchgeführt. In diesem Treffen wurden die Versuchsergebnisse zum Verfahren präsentiert und die Datensituation wichtiger Primärproduktionsketten diskutiert. Weiterhin wurden bereits erste, noch vorläufige Ökobilanz-Ergebnisse präsentiert und die finale Auswahl von Daten und methodischen Festlegungen der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung besprochen.

In diesen Besprechungen hat der externe Sachverständige zu den vorgestellten Zwischenergebnissen Stellung genommen, verschiedene Hinweise bezüglich der Normkonformität der Studie und Empfehlungen für den weiteren Verlauf der Studie gegeben.

Die formale Prüfung auf Normkonformität begann nach Vorlage des ersten Entwurfes des Abschlußberichtes der Studie am 04. November 2016. Der Sachverständige hat den Bericht umfassend analysiert und auf Normkonformität geprüft. Die Prüfung ergab insgesamt 72 Hinweise genereller, technischer und redaktioneller Art, die dem Auftraggeber am 18. November 2016 übermittelt wurden. Der zweite, überarbeitete Entwurf des Abschlußberichtes wurde dem Prüfer am 30. Januar 2017 übermittelt. Die Prüfung des zweiten Entwurfes ergab, dass die Prüfhinweise konstruktiv und umfassend berücksichtigt wurden. Es verblieben nur noch wenige offene Punkte oder Rückfragen, die in Form von fünf weiteren Kommentaren am 02. Februar 2017 an den Auftraggeber übermittelt wurden. Die finale Version des Abschlußberichtes wurde dem Prüfer am 07. Februar 2017 übermittelt. Die Umsetzung der vereinbarten Maßnahmen und der Kommentare wurde geprüft, es waren keine weiteren Hinweise oder Maßnahmen notwendig.

Der Sachverständige bedankt sich für den uneingeschränkten Zugang zu allen nachgefragten Informationen sowie die offene und konstruktive Haltung während des gesamten Prüfungsverfahrens.

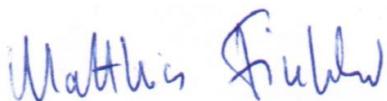
### **Bewertung**

Die Ökobilanz dient zur projektbegleitenden Bewertung des Recyclingverfahrens des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderten Projektes „Elektrofahrzeugrecycling 2020 - Schlüsselkomponente Leistungselektronik“, das unter der Koordination des Öko-Instituts mit den Verbundpartnern Electrocycling GmbH, PPM Pure Metals GmbH, TU Clausthal und Volkswagen AG durchgeführt wurde. Den beteiligten Verbundpartnern sollen damit zeitnah die ökologischen Vorteile und Schwachstellen der entwickelten Verfahren aufgezeigt werden.

Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss für die Ökobilanzen ist das Recycling von 1000 kg Leistungselektronik einer durchschnittlichen Zusammensetzung. Dies zeigt, dass die Systemgrenze so gewählt wurde, dass die primäre Herstellung und auch die Nutzung der Leistungselektronik nicht analysiert werden, sondern der Fokus auf dem Recycling liegt. Die erhaltenen Netto-Gutschriften beziehen sich also nur auf die End-of-Life-Phase und gelten nur unter der Annahme, dass die Leistungselektronikkomponenten ökologisch lastenfrei in die Bilanz eingehen. Deshalb wird auch einschränkend in der Studie ausgeführt, dass die Ergebnisse nicht mit den Ökobilanzen anderer Recyclingverfahren verglichen werden können. Es wird transparent darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse unter dem Vorbehalt bewertet werden müssen, dass die Sachbilanzdaten auf nicht serienreifen Einzel- und Laborversuchen beruhen.

### **Ergebnis**

Die Ökobilanz wurde in Übereinstimmung mit ISO 14040 and ISO 14044 erstellt. Die verwendeten Methoden und die Modellierung des Produktsystems sind geeignet, die in der Studie formulierten Ziele zu erfüllen. Der Bericht ist umfassend und beschreibt den Untersuchungsrahmen der Studie in transparenter Weise.



Matthias Finkbeiner  
08. Februar 2017