

# Elektrofahrzeugrecycling 2020

## – Schlüsselkomponente Leistungselektronik –

Winfried Bulach, Doris Schüler, Guido Sellin, Tobias Elwert, Dieter Schmid,  
Daniel Goldmann, Matthias Buchert und Ulrich Kammer

1.	Stand von Wissenschaft und Technik	3
1.1.	Stand der Technik und Trends in der Leistungselektronik	3
1.2.	Stand der Recyclingtechnik	4
1.2.1.	Altfahrzeugrecycling	4
1.2.2.	Elektronikrecycling	5
2.	Analyse der Leistungselektronik	6
3.	Entwicklung einer Recyclingroute für die Leistungselektronik mit optimierter mechanischer Aufbereitungstechnik	7
3.1.	Demontage der Leistungselektronik	7
3.2.	Zerlegung und mechanische Aufbereitung	7
3.3.	Weitere Verwertung der erzeugten Wertstofffraktionen	9
4.	Entwicklung einer zusätzlichen Aufbereitungsstufe mittels chemischer Platinentstückung	9
5.	Ökobilanzielle Betrachtung	10
5.1.	Ökobilanzen	10
5.1.1.	Methodik und Systemgrenzen	10
5.1.2.	Rückgewinnungsquoten	12
5.1.3.	Ergebnisse	12
5.2.	Ressourceneinsparungspotentiale	13
6.	Ökonomische Betrachtung	14
7.	Zusammenfassung	15
8.	Literatur	16

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 [6], 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 zu-nehmenden 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 [14]. 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 Edle- 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 Electroycling 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 [2], LithoRec I [3], LithoRec II [5], Eco-BatRec [4]) und zum anderen mit elektrischen Fahrtrieben (MORE [18]) beschäftigt haben, beleuchtet dieses Projekt die dritte wichtige Komponente von Elektrofahrzeugen.

# 1. Stand von Wissenschaft und Technik

## 1.1. Stand der Technik und Trends in der Leistungselektronik

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 verschiedenen Funktionen und besteht aus folgenden Teilen [1]:

- 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.

Ein F&E-Schwerpunkt ist die Entwicklung von neuen Halbleitermaterialien wie Siliziumcarbid oder Galliumnitrid in den Leistungschips anstelle des derzeit verwendeten Siliziums. Beide neuen Halbleitermaterialien ermöglichen den Betrieb der Leistungschips mit höheren Frequenzen und höheren Temperaturen. Dies wiederum ermöglicht die Miniaturisierung der Leistungselektronikmodule. Eine wichtige Voraussetzung ist jedoch, dass die Bauteile in der Peripherie den höheren Temperaturen von etwa 120 °C anstatt der bisherigen 80 °C standhalten. Die heute üblichen Lötzinlegierungen 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 [12, 17].

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 aufzusplitten und an den Rädern anzubringen. Auch gibt es bereits Prototypen, bei denen die Leistungselektronik in den Motor integriert ist [11]. 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 [17].

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 ändern. Es werden deshalb Recyclingkonzepte benötigt, die eine gewisse Flexibilität aufweisen. Auch ist es wahrscheinlich, dass die Materialeffizienz steigen wird und die Leistungselektronik pro kW leichter werden wird. Es ist jedoch denkbar, dass diese Materialgewinne durch höhere Gesamtleistungen aufgrund steigender Kundenansprüche kompensiert werden.

## 1.2. Stand der Recyclingtechnik

### 1.2.1. Altfahrzeugrecycling

Stand der Technik beim Recycling von Altfahrzeugen ist der Autoshreder mit nachgeschaltetem Post-Shredder wie in Bild 1 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.

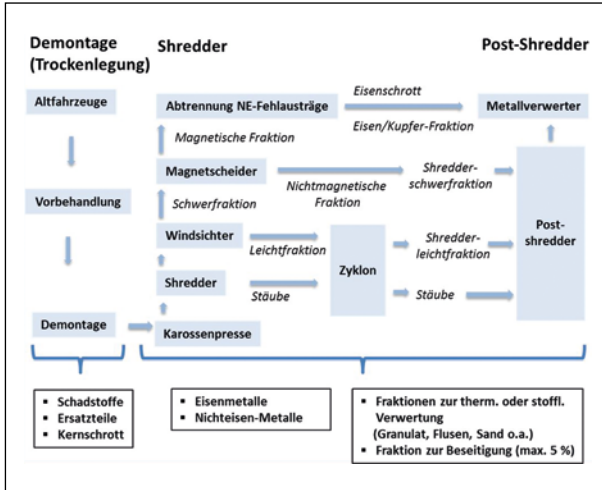


Bild 1:

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 geschreddert.

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 [21], von wo sie nur schwer rückgewinnbar sind.

### 1.2.2. 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 Autoshrredder bzw. Post-Shredder 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 Post-Shredder 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 [20]. 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 [16], die automatisierte Abtrennung von Leiterplatten mittels Robotern [15], Ablöten sowie die händische Demontage. Keiner der Ansätze wurde bisher industriell umgesetzt.

## 2. Analyse der Leistungselektronik

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden durch die Partner Electrocycling und TU Clausthal etwa 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 1 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 fünf Prozent der Platinen, wobei nur ein Teil der Platinen Tantalkondensatoren enthält und einige Hersteller auf Tantalkondensatoren vollständig verzichten.

Die oben genannten Platinen wurden in einem separaten Schritt auf ihren Metallgehalt hin untersucht. In Tabelle 2 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.

Wenn man die durchschnittliche Zusammensetzung der Leistungselektronik mit dem durchschnittlichen Metallgehalt der Platinen kombiniert, erhält man die in

Tabelle 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

Tabelle 2: Durchschnittlicher Metallgehalt der Platinen

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

Tabelle 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

Tabelle 3 dargestellte durchschnittliche stoffliche Zusammensetzung der Leistungselektronik, auf deren Basis die ökologischen und ökonomischen Betrachtungen zur Rückgewinnung durchgeführt wurden.

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

Die Leistungselektronik hat auf Grund ihres Metallgehalts einen hohen Wert. Haupterlösquelle ist das Aluminiumgehäuse. Weitere Erlösquellen sind Kupfer und die in geringen Mengen eingesetzten Edelmetalle. Um einen möglichst hohen Anteil dieser Metalle wieder in den Wirtschaftskreislauf zu bringen, müssen Verluste minimiert werden. Für die Massenmetalle Aluminium und Kupfer erzielt der Autoshrredder in Verbindung mit einer modernen nachgeschalteten Aufbereitungsanlage gute Rückgewinnungsraten. Platinen können aber im Autoshrredder soweit zerkleinert werden, dass die geringe Menge an Edelmetallen nur noch in Staubform vorliegt. Dieser verteilt sich über alle Sortierfraktionen und kann verloren gehen. Im Projekt wurde nach Möglichkeiten gesucht diese Verluste zu vermeiden und die Rückgewinnungsrate für Edelmetalle und weitere strategische Metalle zu optimieren. Hierzu wurde im ersten Schritt die Leistungselektronik aus dem Elektrofahrzeug demontiert. Nach der Entnahme der Leistungselektronik aus dem Auto wurde diese in ihre Einzelteile zerlegt bzw. zerkleinert und in verwertbare Fraktionen sortiert.

#### 3.1. Demontage der Leistungselektronik

Im Auftrag von Volkswagen hat die FIT GmbH 58 Fahrzeugmodelle von 22 Herstellern untersucht. Dies entspricht mehr als 95 % der im ersten Halbjahr 2015 in Deutschland angebotenen elektrifizierten Fahrzeugmodelle. Hier wurden die Zugänglichkeit und die Ausbaubarkeit der Leistungselektronik untersucht. Es wurden Ausbauezeiten ermittelt, welche für eine wirtschaftliche Betrachtung der Recyclingroute notwendig sind. Etwa 75 % der ermittelten Demontagezeiten wurden als belastbar angesehen und zur Bewertung herangezogen. Als Ergebnis zeigt sich, dass die mittlere Demontagezeit etwa 15 Minuten beträgt, was etwa 7,50 EUR Arbeitskosten entspricht.

#### 3.2. Zerlegung und mechanische Aufbereitung

Im nächsten Schritt wurden mit den ausgebauten Leistungselektronikmodulen zunächst manuelle und später auch maschinelle Demontageversuche durch Electrocycling durchgeführt. Im Fall der manuellen Zerlegung wurden der Arbeitsaufwand und die aus der Zerlegung hervorgehenden Einzelteile untersucht. Es zeigte sich, dass der personelle Aufwand der manuellen Zerlegung so hoch ist, dass er den Wert der Metalle in der Leistungselektronik deutlich übersteigt und eine Implementierung in

die Praxis aus Kostengründen nicht realisierbar erscheint. Aus diesem Grunde wurden Versuche zu einer maschinellen Zerlegung der Leistungselektronik mittels Prallmühle (Bild 2) durchgeführt.

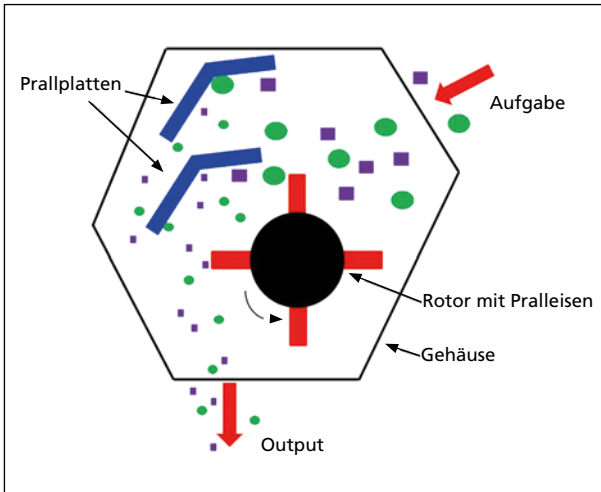


Bild 2:

Aufbau einer Prallmühle

Die Ergebnisse dieser Versuche waren erfreulich. Die Leiterplattenfraktion lag nach der Sortierung weitestgehend intakt vor, was eine direkte Einspeisung in etablierte Elektrorecyclingrouten ermöglicht. Dies ist die Voraussetzung für hohe Rückgewinnungsquoten der strategischen Metalle. Zudem waren die erhaltenen Fraktionen sehr rein. Auf den Bildern 3 und 4 sind Beispiele für die erhaltenen Fraktionen gezeigt.



Bild 3: Fraktion Aluminium mit Anhaftungen



Bild 4: Fraktion Leiterplatten

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.



### 3.3. 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 wird direkt in Aluminiumschmelzwerken eingesetzt. Die Leiterplattenfraktion wird 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 weiteraufbereitet, angereichert und gelangen möglichst sortenrein in die geeigneten Hüttenprozesse.

### 4. Entwicklung einer zusätzlichen Aufbereitungsstufe mittels chemischer Platinenentstückung

Durch die vom Projektpartner Electro cycling 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. Abschnitt 2.2.2). 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)) entstückeln 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 et al. [16] beschriebenen Verfahren erzeugen. Durch eine sortierende Klassierung bei etwa 2 mm lässt sich in vielen Fällen eine palladiumreiche Fraktion mit Palladiumgehalten um 1.000 ppm erzeugen.

## 5. Ökobilanzielle Betrachtung

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 einer Million Leistungselektronikmodulen jährlich abgeschätzt.

### 5.1. Ökobilanzen

#### 5.1.1. Methodik und Systemgrenzen

Die Ökobilanzen wurden nach ISO 14040/44 [8, 9] mit der Bilanzierungssoftware GaBi 6.0 [19] auf Basis von Ecoinvent 3.1 [10] durchgeführt. Als Wirkungsabschätzungsmethode wurde CML [7] in seiner Fassung von 2015 verwendet. Zur Untersuchung wurden die Wirkungskategorien Klimaerwärmungspotential (GWP), Eutrophierungspotential (EP), Versauerungspotential (AP), Photooxidantienbildungspotential (POCP), abiotischer Ressourcenverbrauch fossilen Typs (ADP<sub>fossil</sub>) und abiotischer Ressourcenverbrauch mineralischen Typs (ADP<sub>elementar</sub>) herangezogen. Die betrachtete funktionelle Einheit ist die Verwertung von einer Tonne Leistungselektronik, welche ohne Lasten in das Recycling geht.

In den Bildern 5 bis 7 sind die Systemgrenzen der drei betrachteten Routen dargestellt.

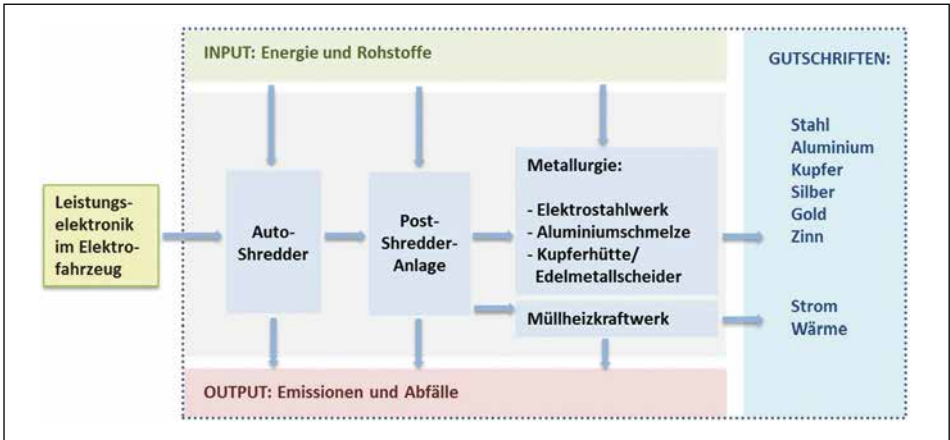


Bild 5: Systemgrenzen der Autoschredderroute

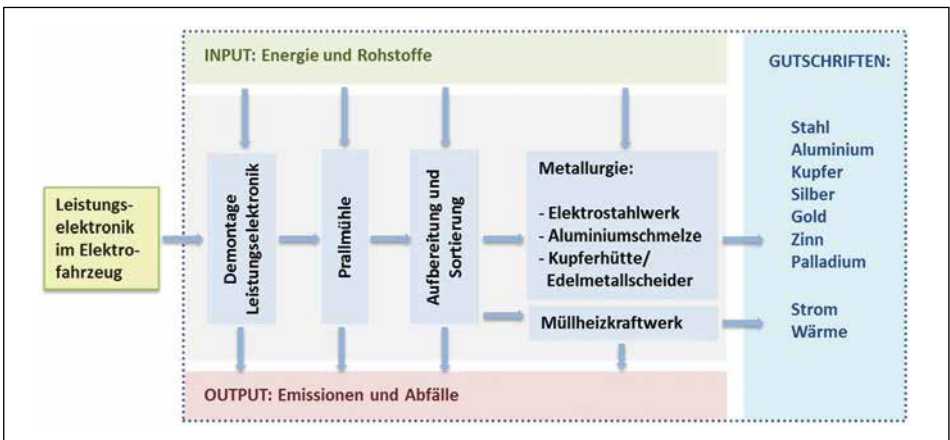


Bild 6: Systemgrenzen der Elektrorecyclingroute

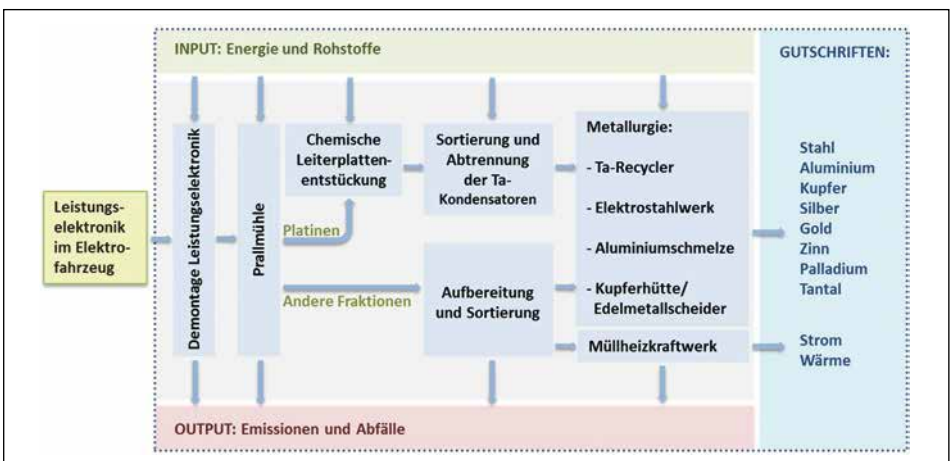


Bild 7: Systemgrenzen der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentrennung

### 5.1.2. Rückgewinnungsquoten

Von entscheidender Bedeutung für das Forschungsvorhaben und die Bewertung der zu entwickelnden Verfahren sind die ökologischen Potentiale der Elektrorecyclingroute im Vergleich zur Autoshrredderroute. 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 etwa 20 bis 25 % wiedergewonnen werden, während es bei der Aufbereitung beim Elektroaltgeräte recycler etwa 98 % sind. Diese Abschätzung beruht darauf, dass bei der Autoshrredderroute ein Großteil der Edelmetalle über fein verteilte Staubausträge 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 etwa 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.

### 5.1.3. Ergebnisse

Sowohl für die Autoshrredderroute als auch für die Elektrorecyclingroute ergeben sich hohe Nettogutschriften für alle Wirkungskategorien (GWP, ADP<sub>fossil</sub>, AP, ADP<sub>elementar</sub>, 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 (Bild 8) die Ergebnisse für die Elektrorecyclingroute für das Klimaerwärmungspotenzial dargestellt. Für den interessierten Leser werden die Detailergebnisse in 2017 in einem umfangreichen Ökobilanz-Bericht veröffentlicht.

Die Ergebnisse für die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinentstückung sind weitgehend identisch mit den Ergebnissen der Elektrorecyclingroute, da sich die Sachbilanz im Wesentlichen nur durch den zusätzlichen Aufwand der chemischen

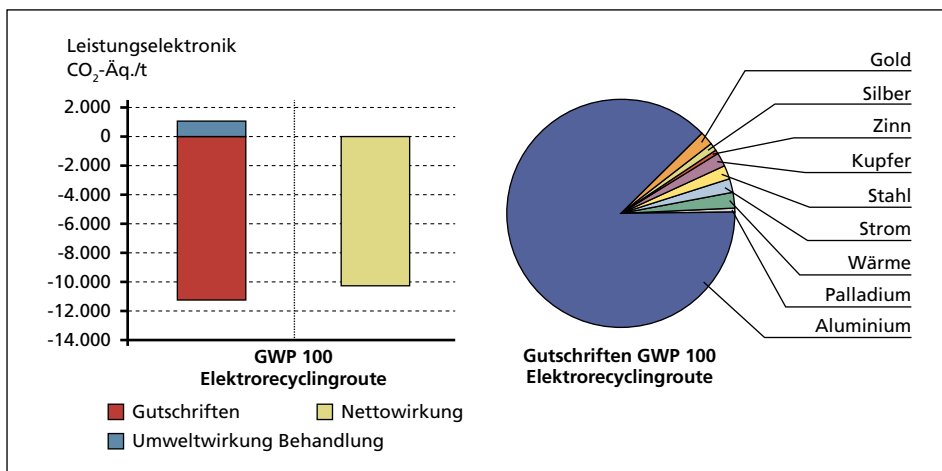


Bild 8: Ergebnisse für die Wirkungskategorie Klimaerwärmungspotential für die Elektrorecyclingroute, bezogen auf eine Tonne Leistungselektronik

Platinenentstückung und die zusätzliche Gutschrift aus der Tantalverwertung unterscheidet. Da die Tantal mengen 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 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.

## 5.2. Ressourceneinsparungspotentiale

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 Auto-shredderroute 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 Auto-shredderroute 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 einer Million Leistungselektronik-Modulen ein derzeitiger Verbrauch von 12.000 kg im gesamten Elektrik- und Elektronikbereich in Deutschland gegenüber [13].

## 6. Ökonomische Betrachtung

In den Tabellen 4 bis 6 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 4: Ökonomische Bilanzierung der Autoshredderroute, bezogen auf eine Tonne Leistungselektronik

Verwertungskosten	EUR	Erlöse	EUR
Autoshredder inklusive Aufbereitung und Postshredder	200	Erlöse durch Verkauf der Fraktionen aus Autoshredderroute	887
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 5: Ökonomische Bilanzierung der Elektrorecyclingroute, bezogen auf eine Tonne Leistungselektronik

Verwertungskosten	EUR	Erlöse	EUR
Demontage	591	Erlöse durch Verkauf der Fraktionen aus Elektrorecyclingroute	1.006
Transport Demontage → Elektrorecycler und Elektrorecycler → Endverwerter	24		
Prallmühle inklusive Aufbereitung	246		
<b>Gesamtkosten</b>	<b>861</b>	<b>Gesamterlöse</b>	<b>1.006</b>
<b>Bilanzsumme</b>	<b>145</b>		

Die Autoshredderroute ist das mit Abstand günstigste Verfahren, da hier keine Demontage erforderlich ist und die Behandlungskosten aufgrund des hohen Durchsatzes niedrig sind. Die hohen Demontageskosten führen bei der Elektrorecyclingroute zu deutlich höheren Kosten. In Summe erzielt sie aber dennoch ein positives Ergebnis

Tabelle 6: Ökonomische Bilanzierung der Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinenentstückung, bezogen auf eine Tonne Leistungselektronik

Verwertungskosten	EUR	Erlöse	EUR
Demontage	591	Erlöse durch Verkauf der Fraktionen aus Elektrorecyclingroute	1.006
Transport Demontage → Elektrorecycler und Elektrorecycler → Endverwerter	24	Erlös Ta-Kondensatoren	2
Prallmühle inklusive Aufbereitung	246	Erlös Zinnsulfid	10
Salzsäure, Wasserstoffperoxid, Natriumsulfit	10		
Investitions-, Personal- und Stromkosten für Platinenentstückung	34		
Abwasserentsorgung	19		
Sortierung Ta-Kondensatoren	2		
<b>Gesamtkosten</b>	<b>926</b>	<b>Gesamterlöse</b>	<b>1.018</b>
<b>Bilanzsumme</b>	<b>92</b>		

und ist somit bei den gewählten Annahmen wirtschaftlich darstellbar. Dies gilt, wenn auch in geringerem Umfang, für die Elektrorecyclingroute mit chemischer Platinenentstückung. Die Annahmen für die chemische Platinenentstückung sind jedoch im Gegensatz zu den anderen Routen mit hohen Unsicherheiten verbunden.

## 7. 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 Elektroaltgerätrecycler 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 Elektroaltgerätrecyclern 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 Autoshredder 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 Autoshredder verbunden ist. Die Ökobilanz zeigt grundsätzlich gute Ergebnisse sowohl für die Autoshredderroute als auch die Elektrorecyclingroute; bei letzterer kommen durch partiell höheren Rückgewinnungsquoten jedoch noch Vorteile durch entsprechende Gutschriften hinzu.

Weiterhin wurden in ElmoReL Versuche zur chemischen Platinenentstückung 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 Platinenentstückung 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.

## 8. Literatur

- [1] Bauer, W.; Rothfuss, F.; Dungs, J.; Herrmann, F.; Cacilo, A.; Schmidt, S.; Brand, M.; Klausmann, F.; Borrmann, D.: Strukturstudie BWe 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)
- [2] Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C.; Schüler, D.: Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBRI. Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren. Darmstadt: Öko-Institut, 2011
- [3] Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C., Schüler, D.: Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec I). Darmstadt: Öko-Institut, 2011
- [4] Buchert, M.; Sutter, W.: Ökobilanzen zum Recyclingverfahren EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien. Darmstadt: Öko-Institut, 2015
- [5] Buchert, M.; Sutter, W.: Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien. Öko-Institut, Darmstadt, 2015
- [6] 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)
- [7] CML Leiden: Database CML-IA v4.4. Leiden: Institute of Environmental Sciences, Leiden University; <http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>, January 2015
- [8] DIN EN ISO 14040:2009-11 Umweltmanagement - Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2009-11). Berlin, 2009
- [9] DIN EN ISO 14044:2006-10 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006-10). Berlin, 2006
- [10] ecoinvent: Ökobilanz-Datenbank ecoinvent v3.1. Zürich, 2014; <http://www.ecoinvent.org>; integriert in GaBi v6.0
- [11] Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie: Günstigere Elektrofahrzeuge durch motorintegrierte Leistungselektronik: Start für Projekt EMiLE. Erlangen, 2013
- [12] Grasshoff, T.: Einen Schritt voraus – Aufbau- und Verbindungstechnik optimiert Leistungselektronik. In: elektronik Journal, Mai 2011, S. 12-16
- [13] Huy, D.; Andruleit, H.; Babies, H.-G.; Elsner, H.; Homberg-Heumann, D.; Meßner, J.; Röhring, S.; Schauer, M.; Schmidt, S.; Schmitz, M.; Szurlies, M.; Wehenpohl, B.; Hofrichter, W.; Tallig, A.: Deutschland – Rohstoffsituation 2014. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, November 2015



- [14] Kohlmeier, R.; Groke, M.; Sander, K.; Bergamos, M.: Perspektiven der zunehmenden Fahrzeug-elektronik für das Altfahrzeugrecycling. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D.: Recycling und Rohstoffe, Band 8. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015, S. 183-205
- [15] Kreibe, S.; Förster, A.: Strategische Metalle aus Telekommunikations-Netztechnik: Endlich eine Chance für Robotik? In: Pomberger, R. et al. (Hrsg.): Tagungsband zur 13. Recy & DepoTech-Konferenz. Leoben: Abfallverwertungstechnik & Abfallwirtschaft Eigenverlag, 2016, S. 183-188; Recy & DepoTech 2016, 08.-11.11.2016
- [16] 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
- [17] Schüler, D.: Mündliche Experteneinschätzungen von Herstellern auf der PCIM Europe in Nürnberg, 2015
- [18] 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 Fahrtrieben – Motor Recycling (MORE). Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über Forschungszentrum Jülich, 2014
- [19] thinkstep AG: Ökobilanzierungssoftware GaBi v6. Leinfelden-Echterdingen, 2015
- [20] 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: Worrell, E., Reuter, M. (Eds.): Handbook of Recycling: State-of-the-Art for Practitioners, Analysts, and Scientists. Elsevier: Waltham (UK), 2014, S. 307-378
- [21] 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