

# Ökobilanzieller Vergleich von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor

Einflüsse der Recyclingphase auf die Ergebnisse der Ökobilanz

Niklas Fuge

Technische Hochschule Köln, Betzdorfer Str. 2, 50679 Köln

Masterprojekt unter der Leitung von Prof. Dr. Eberhard Waffenschmidt und Prof. Dr. Johanna May

15. September 2018

**Abstract** Die in kritischen Diskussionsrunden, über die Umgestaltung des deutschen Straßenverkehrs hin zur Elektromobilität, immer wieder aufkommende Frage, ob ein Elektrofahrzeug wirklich einen ökologischen Vorteil im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren bietet oder aber sogar umweltschädlicher ist, wurde im Rahmen der Erarbeitung eines ökobilanziellen Vergleich zwischen zwei Modellgleichen Ausführungsvarianten eines Smarts thematisiert. Das vorliegende Paper untersucht in diesem Zusammenhang die Recyclingphase der beiden betrachteten Fahrzeuge. Dabei wurden aktuelle Forschungsstudien aufgearbeitet, die sich mit dem Recyceln von Komponenten in Elektrofahrzeugen, zu denen es noch keine gängigen Recyclingrouten gibt, beschäftigen. Hinzu kommt die Simulation der in Deutschland nach Altfahrzeug-Gesetz standardisierten Altfahrzeugverwertungsrouten. Ergebnis der Untersuchung ist, dass die Recyclingphase des Elektrofahrzeuges im Vergleich zum Verbrennungsmotor höheren Einsparungen des Treibhauspotentials entspricht. Diese erhöhten Gutschriften können jedoch nicht den ökologischen Mehraufwand der Herstellungsphase eines Elektrofahrzeuges glätten. Erst die Nutzungsphase erzeugt eine positive Ökobilanz des Elektrofahrzeuges gegenüber der Ökobilanz des Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor.

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
1. Einleitung.....	1
2. Methodik.....	1
2.1 Erarbeitung der beiden Recyclingrouten.....	2
3. Ergebnisse.....	2
3.1 Recycling Lithium-Ionen-Batterie.....	2
3.2 Recycling Leistungselektronik.....	3
3.3 Recycling in der Altfahrzeugverwertung3	
3.4 Ganzheitliche Betrachtung.....	4
4. Fazit.....	4
Literaturverzeichnis.....	5

## 1. Einleitung

Die hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen des derzeitigen Mobilitätssektors, haben starken Einfluss auf den Klimawandel. In Zeiten der Energiewende, rückt der Einsatz von Elektrofahrzeugen im deutschen Straßenverkehr immer mehr in den Fokus. Die Elektromobilität bietet Kopplungsmöglichkeiten mit dem Einsatz von erneuerbaren Energien. Durch die im Elektrofahrzeug zum Einsatz kommende Batterie, können die für den Straßenverkehr benötigten konventionellen Treibstoffe, durch die Nutzung von Strom ersetzt werden. In Verbindung mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien, welche nicht mit CO<sub>2</sub>-Emissionen behaftet sind bieten sich hohe Potenziale zur Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Jedoch hat der Einsatz von Elektromobilität auch Nachteile, die notwendige Batterie bedarf einem

hohen Anteil an seltenen Erden, welcher mit einem hohen Aufwand in den Rohstoffgewinnungsprozessen einhergeht. Hinzu kommt, dass es für eben diese, als komplexes Bauteil zu betrachtende Lithium-Ionen-Batterie noch keine gängigen Entsorgungswege oder Recyclingsrouten gibt. Aufgrund dieses Sachverhaltes kommt immer häufiger die Frage auf, ob Elektrofahrzeuge wirklich einen ökologischen Vorteil gegenüber konventionelle Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor haben. Um diese Frage endgültig zu klären wurde im Rahmen eines Masterprojektes an der Technischen Hochschule Köln, ein ökobilanzieller Vergleich zwischen einem baugleichen Smart, der sowohl eine elektrifizierte Modell, als auch eine Variante mit Verbrennungsmotor hat, hergestellt. Durch den ökobilanziellen Vergleich sollte erforscht werden, welche der beiden Fahrzeugvarianten über den gesamten Produktlebenszyklus, in dem die Phasen Herstellung, Nutzung und Recycling einbezogen wurden, eine bessere Ökobilanz aufweist. Das vorliegende Paper beschäftigt sich mit der Untersuchung der Recycling- und Entsorgungsphase der beiden Fahrzeuge.

## 2. Methodik

Um das Recycling, die sogenannte End-Of-Life (EOL) Phase, in die Sachbilanz miteinfließen zu lassen, gibt es zwei verschiedene Herangehensweisen. Zum einen kann der Cut-Off-Ansatz gewählt werden. Dabei wird das Fahrzeug nach der Nutzungsphase einem neuen System zugeteilt und die Auswirkungen der Entsorgung, getrennt von Herstellung und Nutzung analysiert. Ein weiterer Ansatz ist die Systemerweiterung mittels Substitution. Dabei werden für das Recycling, also die Wiederverwertung und anschließende Nutzung der Materialien, sogenannte Materialgutschriften auf die ökologische Belastung durch Herstellung aufgetragen. Zu begründen ist diese Vorgehensweise anhand der Annahme, dass recycelte Werkstoffe als Sekundärrohstoffe wieder in den Produktions- und Herstellungsprozess zugeführt werden und somit den weiteren Abbau und die Verwendung von Primärrohstoffen ersetzen.

Aufgrund der Zielsetzung der Studie einen ökobilanziellen Vergleich zwischen Elektrofahrzeug und Verbrennungsmotor herzustellen wurde der Ansatz der Systemerweiterung und Substitution gewählt. Dies bedingt der Tatsache, dass durch die Systemerweiterung auch die Auswirkungen der Recyclingphase in das Ergebnis der Ökobilanz mit einbezogen werden können und sich dadurch ein idealer bilanzieller Vergleich der beiden Fahrzeugvarianten über die gesamte Lebensdauer geschaffen werden konnte.

## 2.1 Erarbeitung der beiden Recyclingsrouten

Das Recycling von Elektrofahrzeugen unterscheidet sich hauptsächlich im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen durch den Mehraufwand des Recyclings der Lithium-Ionen-Batterie. Aufgrund der Zellzusammensetzung, sowie den verbauten seltenen Erden in der Batterie, gibt es derzeit noch kein gängiges Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien. Das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderte Pilotprojekt zur Realisierung einer geeigneten Prozesskette für das Recyclingverfahren einer Lithium-Ionen-Batterie (LithoRec) und das darauf aufbauende Forschungsprojekt LithoRec II, werden aus diesem Grund analysiert und als Datengrundlage für die Möglichkeiten des Batterie-Recycling herangezogen.

Des Weiteren werden die Auswirkungen des getrennten Recyclings der Leistungselektronik in einer entsprechenden Elektrorecyclingroute, statt wie bisher in der traditionellen Altfahrzeugverwertungsrouten untersucht. Die im Elektrofahrzeug verbaute Leistungselektronik dient der Transformation aus der Batterie kommenden Energie in die für den Elektromotor genutzte Form. Zu begründen ist dieses Vorgehen an der Tatsache, dass auch in der Leistungselektronik ein hoher Anteil an seltenen Erden verbaut ist, der mit hohen ökologischen Belastungen einhergehen. Ein entsprechender Wiederverwertungsweg, der die eingesetzten Werkstoffe effizient und ohne hohe Verunreinigungen zurückgewinnt, hat daher großes Potenzial. Um die Vorteile der Elektrorecyclingroute in die Studie miteinfließen zu lassen wurde auch hier auf das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderte Projekt, „Elektrofahrzeugrecycling 2020 Schlüsselkomponente Leistungselektronik“ (ElmoRel 2020) zurückgegriffen.

Die restlichen Bestandteile des Elektrofahrzeuges wurden identisch zum Fahrzeug mit Verbrennungsmotor in der für Altfahrzeugen gängigen Altfahrzeugverwertungsrouten betrachtet.

Die Outputs der Altfahrzeugverwertungsrouten werden gemäß den Bedingungen des Altfahrzeug-Gesetzes bestimmt. Diese besagen, dass ein Auto nur die Marktreife erlangt, wenn entweder 85 % des Leergewichtes des Autos wiederverwendet und stofflich verwertet wird, oder aber 95 % wiederverwendet und verwertet wird.

Das Leergewicht des Fahrzeuges ist nach Altfahrzeug-Gesetz §2 Absatz 1 folgend definiert. Das Leergewicht des Fahrzeuges setzt sich zusammen aus dem Leergewicht gemäß Fahrzeugbrief, abzüglich Gewicht des Tankinhalts bei einer 90-prozentigen Füllung.

## 3. Ergebnisse

### 3.1 Recycling Lithium-Ionen-Batterie

Das im Rahmen des Forschungsprojektes „LithoRec“ realisierte Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterie stellt sich wie folgt zusammen. Das Verfahren kann in vier Hauptschritten aufgeteilt werden [1], die kurz erläutert werden.

Zu Beginn des Verfahrens erfolgt die Batterie- und Modulzerlegung. Dabei werden die geschlossenen Zellen der Batterie von dem Gehäuse der Batterie und des Moduls getrennt. Anschließend wird der Rahmen der Batterie und die damit verbundenen Kabel den entsprechenden Recyclingverfahren zugeführt. Bevor der nächste Schritt, die Zellerlegung beginnen kann, wird die Batterie aus Sicherheitsgründen tiefenentladen. Die Zellerlegung umfasst das Auswaschen der Elektrolyte mit geeignetem Lösemittel und die Zerlegung der Zelle in die Einzelteile Kathode, Anode und Separator. Es erfolgt eine Entsorgung des Separators und das Recycling der Anode. Die Kathode wird dem nächsten Verfahrensschritt, der Kathodenseparation zugeführt. Dabei wird die Beschichtung der Kathode von der Ableiterfolie aus Aluminium getrennt. Dieses Vorgehen wird mit Hilfe von mechanischen und thermischen Verfahren durchgeführt. Die abgetrennte Kathodenbeschichtung werden dem letzten Schritt, der Hydrometallurgischen Aufbereitung zugeführt. Dieser Schritt dient der Aufbereitung der Aktivmaterialien aus der Beschichtung. Zur Abtrennung von Kobalt, Nickel und Mangan kommt eine Sulfatlösung zum Einsatz. Das übrig bleibende Lithium wird nach weiterer Aufreinigung als Lithiumhydroxid gewonnen.

Aus den Ergebnissen des LithoRec-Verfahrens ergeben sich für die Lithium Ionen-Batterie, wie Sie mit einer Masse von 150 kg im zu untersuchenden elektrifizierten Smart verbaut ist, die in Abbildung 1 dargestellten CO<sub>2</sub>-Äquivalente.

Es zeigt sich das die Batteriezerlegung die größten Einsparungen des Treibhauspotenziales liefert. Dies ist jedoch nicht der Zerlegung an sich zuzuschreiben, sondern vielmehr dem Recycling der im Batteriegehäuse verbauten Wertmetallen. Die bei der Zellerlegung anfallende Treibhausgasemissionen entstehen durch die Auswaschung, als auch bei der Verbrennung des Lösemittels und des Separators. Die Kathodenseparation bietet weitere Gutschriften durch die Abtrennung der Ableiterfolie aus Aluminium und Zuführung in den Aluminiumrecyclingprozess, dieser Schritt bedarf jedoch auch Energie, die sich negativ auf die Gutschrift auswirkt. Die hydrometallurgische Aufbereitung jedoch, benötigt einen energetischen Mehraufwand und geschieht unter Einsatz weiterer Hilfsstoffe. Für die gesamte Prozesskette ergibt sich somit eine Gutschrift von 155,25 kg-CO<sub>2</sub>-Äquivalent.

	<b>Verbrauch</b> [kg-CO <sub>2</sub> -eq]	<b>Gewinn</b> [kg-CO <sub>2</sub> -eq]	<b>Summe</b> [kg-CO <sub>2</sub> -eq]
<b>Batteriezerlegung</b>	34,95	294,75	-259,8
<b>Zellzerlegung</b>	87,9	48,75	39,15
<b>Kathodenseparation</b>	32,1	40,35	-8,25
<b>Hydro. Aufbereitung</b>	219,15	145,5	73,65
<b>Summe</b>	374,1	529,35	-155,25

Abbildung 1: CO<sub>2</sub>-Äquivalente der LithoRec Prozessschritte

Die Untersuchung zeigte, dass ein Recycling von Lithium-Ionen-Batterien grundsätzlich möglich ist, jedoch aufgrund des hohen Aufwandes des Recyclingprozesses, das dadurch eingesparte Treibhauspotenzial von 155,25 kg-CO<sub>2</sub>-Äquivalent im Vergleich zu dem bei der Herstellung der Batterie aufkommenden Treibhauspotenzial in Höhe von 868 kg-CO<sub>2</sub>-Äquivalent<sup>1</sup> nur einen Bruchteil ausmacht. Es lässt sich daraus resultieren, dass die Ökobilanz einer Lithium-Ionen-Batterie in der Zusammenführung von Herstellung und Recycling stark negativ behaftet ist. Um der Batterie eine positive Ökobilanz zuzuschreiben, muss dementsprechend der ökologische Vorteil in der Nutzungsphase überwiegen. Interessant ist, dass bereits nach heutigem Standpunkt bis zu 75% der in der Batterie verwendeten Materialien zurückgewonnen werden können.

Vergleicht man dieses Ergebnis mit denen im Forschungsprojekt LIBRI „Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterie zukünftiger Elektrofahrzeuge“, zeigt sich, dass die Ergebnisse des Batterierecyclings stark von den untersuchten Methoden abhängig sind [2]. Während die ersten drei Schritte des entwickelten Recyclingprozesses identisch zu den Schritten in der Forschungsstudie LithoRec sind unterscheidet sich der letzte Schritt zur Rückgewinnung von Lithium und Mangan in ihrer Herangehensweise. Es wurde eine pyrometallurgische Herangehensweise untersucht. Dabei wurden die aus den Demontage Schritten erhaltenden Metalle einem Schmelzofenprozess zugeführt und die aus diesem Prozess ausgetragene Schlacken und Stäube einem Aufbereitungsverfahren zugeführt. Die Aufbereitungsweise mittels Pyrometallurgie ergab eine Nettolast des Recyclingprozesses. Hohen Anteil an den Lasten hat auch die Lithiumcarbonatgewinnung aus der Schlackenaufbereitung. Für das Recycling durch Pyrometallurgie einer 150kg schweren Batterie resultierte eine auf das Treibhauspotenzial auswirkende Last von 186,6 kg-CO<sub>2</sub>-Äquivalent.

<sup>1</sup> Siehe Bericht „Ökobilanzieller Vergleich zwischen Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor“

Es lässt sich also feststellen das die Auswirkungen eines möglichen Batterie-Recyclings, stark abhängig ist, von den verwendeten Verfahrensschritte. Hier ergeben sich Forschungspotentiale zur Bestimmung einer optimierten und effizienten Prozesskette.

### 3.2 Recycling Leistungselektronik

Das Ergebnis für das Recyceln der Leistungselektronik in einer entsprechenden Elektrorecyclingroute ist ansprechend. Schon für die Wiederverwertung einer im elektrifizierten Smart verbauten 23 kg schweren Leistungselektronik, ergab eine ökobilanzielle Gutschrift von 232,3 kg-CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Dabei ist zu beachten, das die weitere Aufbereitung der nach der Prallmühle vorliegenden Leiterplatten, aufgrund des ökologischen Mehraufwandes durch die zum Einsatz kommenden Lösemittel nicht ökologisch sinnvoll ist [3]]. Die im Vergleich zur herkömmlichen Altfahrzeugverwertungsrouten zusätzliche Materialgutschriften durch die Zuführung in eine entsprechende Elektrorecyclingroute sind in Abbildung 2, aufgeführt.

<b>Material</b>	<b>Gutschrift pro Tonne [g]</b>	<b>Gutschrift für 23kg [g]</b>
Gold	6.7	0.1541
Silber	23.5	0.5405
Palladium	1.3	0.0299
Zinn	527	12.121

Abbildung 2: zusätzliche Materialgutschriften der Elektrorecyclingroute

Es ergeben sich zwar selbst bei der Zuführung einer Tonne Leistungselektronik in die Elektrorecyclingroute nur zusätzliche Werkstoffgutschriften von wenigen Gramm. Doch aufgrund der Tatsache, dass es sich hierbei um die verstärkte Wiedergewinnung von seltenen Erden handelt, deren Rohstoffgewinnung mit hohen Treibhauspotentiale einhergeht stehts zu empfehlen.

### 3.3 Recycling in der Altfahrzeugverwertung

Die Auswirkungen des Recyclings des Smarts mit Verbrennungsmotor und der übrig bleibenden Komponenten des Elektrofahrzeuges nach Ausbau der Batterie, sowie der Leistungselektronik, werden entlang der gängigen Altfahrzeugverwertungsrouten untersucht. Die im Masterprojekt erarbeitete Sachbilanz der beiden Fahrzeugvarianten, diente als Datengrundlage für die, der Altfahrzeugverwertungsrouten zugeführte Materialzusammensetzung. Dabei wurden jedoch die verbauten Materialien, welche einen Massenanteil von unter 0,5 % haben, aus dem Rahmen der Untersuchung entfernt. Diese hätten ohnehin keinen relevanten Einfluss auf das Ergebnis des ökobilanziellen Vergleichs.

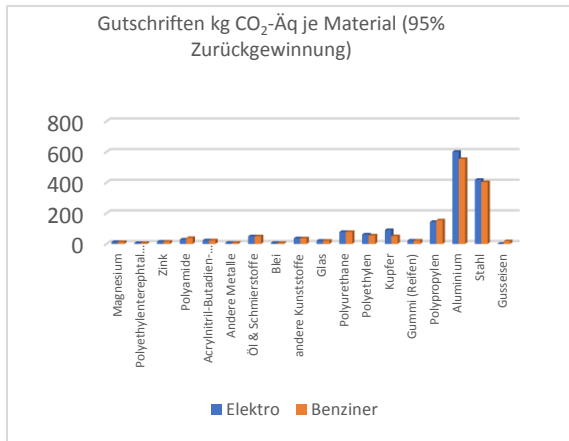


Abbildung 3: eingespartes Treibhauspotential der einzelnen Materialien in der Altfahrzeugverwertungsroute

Es ergaben sich bei einer 95 prozentigen Rückgewinnungsquote gemäß Altfahrzeug-Gesetz folgende Gutschriften. Der Elektro-Smart erhält eine Gutschrift, in Höhe von 1.619,29 kg-CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Für den Smart mit Verbrennungsmotor ergibt sich eine Gesamtgutschrift von 1.548,78 kg-CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Dieser geringfügige Unterschied beider Fahrzeuge kommt hauptsächlich durch die unterschiedlichen Masse an verbautem Aluminium und Kupfer zu Stande. Das liegt daran, dass der Elektromotor im Vergleich zum Benzin-Motor fast 10kg Kupfer mehr verbaut hat. Der Unterschied im Massenanteil des Aluminiums ist auf den höheren Massenanteil des Aluminiums im Antriebsstrang des Elektro-Smart's zurückzuführen. Das Recycling, des erhöhten Kupfer- und Aluminiumanteils führt zu einer positiven Auswirkung auf die Ökobilanz. Zudem liegt eine Differenz zwischen den Massenanteilen des Stahles vor. Der Einfluss ist jedoch aufgrund der vergleichsweise niedrigeren Gutschrift durch das Stahlrecycling pro kg, geringfügig.

Um mögliche Auswirkungen des in der Altfahrzeugverwertungsroute von Anlagen benötigten Stromes auf den ökobilanziellen Vergleich, wurde die zum Einsatz kommende Shredderanlage [4] auf ihren unterschiedlichen Stromverbrauch beim shreddern der beiden Fahrzeugvarianten untersucht. Es zeigte sich, dass die Shredderanlage lediglich eine kWh mehr für das Elektrofahrzeug im Vergleich zum Verbrenner benötigte. In Folge dessen lässt sich also feststellen, dass ein unterschiedlicher Energiebedarf der Anlagen in der Altfahrzeugverwertung keinen relevanten Einfluss auf das Ergebnis des ökobilanziellen Vergleiches hat. Zu begründen ist dieses Ergebnis, an der Tatsache, dass die beiden Fahrzeugvarianten in der Altfahrzeugverwertungsroute eine fast identische Masse besitzen. Es liegt eine Differenz von lediglich 6,5 kg. Aufgrund des Ergebnisses dieser Stichprobenuntersuchung wurde der weitere Energiebedarf in den Verwertungswegen zur Sekundärrohstoffgewinnung nicht detaillierter betrachtet.

<sup>2</sup> Siehe Bericht „Ökobilanzieller Vergleich zwischen Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor“

### 3.4 Ganzheitliche Betrachtung

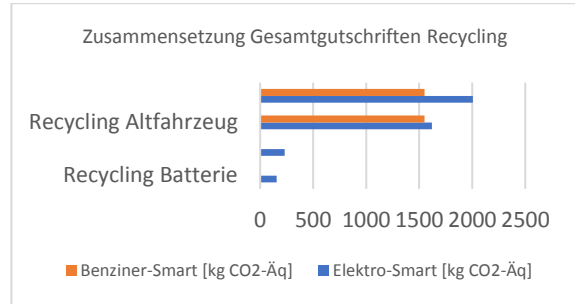


Abbildung 4: Gesamtgutschriften der beiden Fahrzeugvarianten

Die Aufsummierung der Einzeluntersuchungen liefert, folgendes Gesamtergebnis. Für das Recyceln eines Elektrofahrzeuges ergibt sich eine Gutschrift des Treibhauspotenzials (GWP) in Höhe von 2.006,84 kg-CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Das Recyceln des Modells mit Verbrennungsmotor ergibt eine Gutschrift von 1.548,78 kg-CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Die erhöhte Gutschrift für das Recyceln des Elektrofahrzeuges resultiert aus der erhöhten Masse an verbauten Materialien. Vergleicht man die erhöhte Gutschrift des Elektrofahrzeugrecyclings in Höhe von 458,06 kg-CO<sub>2</sub>-Äquivalent mit dem bei der Herstellung aufkommenden Mehraufwand des Elektroautos gegenüber dem Verbrennungsmotor, zeigt sich jedoch dass allein der Mehraufwand durch die Herstellung der Batterie von 868 kg-CO<sub>2</sub>-Äquivalent<sup>2</sup> nicht aufwiegen kann. Von hoher Bedeutung sind aus diesem Grund die Ergebnisse der Nutzungsphase. Schon bei der Nutzung des zum laden benötigten Stromes aus dem derzeitigen Strommix in Deutschland, bietet das Elektrofahrzeug in der Nutzungsphase eine Ersparnis des Treibhauspotenzials von 9.650 kg-CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Während die zusammengeführten Ergebnisse von Herstellung und Recycling dem Elektrofahrzeug eine schlechtere Ökobilanz attestieren, verbessert die Nutzungsphase das Gesamtergebnis der Ökobilanz des Elektrofahrzeug gegenüber dem Verbrennungsmotor deutlich. Das Elektrofahrzeug hat somit über die gesamte Lebensdauer eine Gesamtersparnis im Vergleich zu konventionellen Antrieben von 8.677,09 kg-CO<sub>2</sub>-Äquivalent.

### 4. Fazit

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass ein Elektrofahrzeug über den gesamten Lebenszyklus eine bessere Ökobilanz, als ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor aufweist. Es ergeben sich zwar hohe Umweltbelastungen während der Herstellungsphase, diese werden aber in der Nutzungs- und Recyclingsphase deutlich aufgewogen. Dementsprechend birgt eine Umstellung des Straßenverkehrs auf Elektromobilität ein hohes umweltschonendes Potential. Der Vorteil des Elektrofahrzeuges gegenüber dem Verbrennungsmotor verstärkt sich noch zusätzlich durch den weiteren Ausbau von Erneuerbaren Energien in Deutschland und dem damit verbundenen erhöhten Anteil an EE im deutschen Strommix.

## Literaturverzeichnis

- [1] Ökobilanz zum "Recycling von Lithium-Ionen-Batterien" (LithoRec), Buchert, M., Jenseit, W., Merz, C. u. Schüler, D., Darmstadt 2011
- [2] The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion-Batteries. A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles, Dahllöf, L. u. Romare, M., 2017
- [3] Elektrofahrzeugrecycling 2020. Schlüsselkomponente Leistungselektronik, Bulach, W., Schüler, D., Sellin, G., Schmid, D., Goldmann, D., Buchert, M. u. Kammer, U., 2017
- [4] Ökobilanzierung der Altfahrzeugverwertung am Fallbeispiel eines Mittelklassewagens und Entwicklung einer Allokationsmethodik, Wötzel, K., Braunschweig 2006