
Masterprojekt im Masterstudiengang Erneuerbare Energien

Ökobilanzieller Vergleich zwischen Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor

vorgelegt von

Niklas Fuge **11127911**

Olga Kanz **11129462**

Philip Schürheck **11125879**

September 2018

Masterprojekt

Titel: Ökobilanzieller Vergleich von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor

Gutachter:

- Prof. Dr. Jonanna May (TH Köln)
- Prof. Dr. Eberhard Waffenschmidt (TH Köln)

Zusammenfassung:

In dieser Ausarbeitung wurde eine Ökobilanz eines Elektrofahrzeuges sowie eines vergleichbaren Referenzfahrzeuges mit konventionellem Benzinantrieb am Beispiel eines Smart-Modells durchgeführt. Zur Identifikation des Klimaeffekts wurden die direkten sowie indirekten Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge von der Herstellung über den Betrieb und das Recycling analysiert. Trotz der energieaufwendigen Herstellung der Batterie konnte eine positive Ökobilanz des Elektro-Smarts im Vergleich zum herkömmlichen Fahrzeug festgestellt werden. Die Sensibilitätsanalyse ergab zusätzlich, dass die Betriebsphase des Fahrzeuges das größte Potenzial hinsichtlich der Reduzierung von umweltschädlichen Emissionen ermöglicht. Diese Tatsache demonstriert dabei die Relevanz der künftigen Rolle der klimafreundlichen Stromproduktion für den Verkehrssektor.

Stichwörter: Elektromobilität, Smart, Ökobilanz, Straßenverkehr

Datum: 15. September 2018

Masterprojekt

Title: Life cycle assessment comparison of Battery Electric Vehicles and petrol cars

Reviewers:

- Prof. Dr. Jonanna May (TH Köln)
- Prof. Dr. Eberhard Waffenschmidt (TH Köln)

Abstract: This work aims at quantifying the LCA of a mini class car Smart as a BEV in comparison to the petrol version of the Smart. The project covers the complete life cycle and focuses on quantifying the impact on the climate change according to the carbon footprint of both models. The results show a favourable environmental impact of the modeled battery electric vehicle compared to the petrol car even when charged with the German electricity mix. The sensitivity analyses reveals the biggest benefits of BEV and the potential for the reduction of the emissions in the operating phase. The overall significance of the electricity production on the LCI requires in general an additional attention to this aspect.

Keywords: Battery electric vehicle, Smart, LCA, road traffic

Date: 15 September 2018

Inhalt

Masterprojekt.....	II
Masterprojekt.....	II
Inhalt III	
Einleitung	6
1 Motivation.....	7
1.1 Kenntnisstand.....	7
1.2 Untersuchungsrahmen	7
2 Methodik.....	8
2.1 Vorgehen bei einer Ökobilanz	8
2.1.1 Zielsetzung und Systemgrenzen	8
2.1.2 Sachbilanz	8
2.1.3 Wirkungsabschätzung	9
2.1.4 Auswertung.....	10
2.2 Verwendete Datenquellen	11
Ökobilanz des SMARTs	12
3 Zielsetzung und Systemgrenzen	12
4 Sachbilanz.....	13
4.1 Produktherstellung.....	13
4.1.1 GaBi	13
4.1.2 Elektro-SMART	13
4.1.3 SMART mit Verbrennungsmotor	27
4.2 Nutzung	29
4.2.1 Aufstellen der Sachbilanz im Betrieb.....	30
4.2.2 Getroffene Annahmen und Bilanzierungsgrenzen	30
4.2.3 Mobilitätsverhalten.....	30
4.2.4 Sachbilanz E-Smart.....	31
4.2.5 Sachbilanz Benzin-Smart	36
4.3 Recycling	38
4.3.1 Recycling Lithium-Ionen-Batterie	39
4.3.2 Recycling Leistungselektronik	40
4.3.3 Recycling Altfahrzeuge (Altfahrzeugverwertung)	41
4.3.4 Stromverbrauch Anlagenkomponenten Altfahrzeugverwertung	45
5 Wirkungsabschätzung	48
5.1 Herstellung	48
5.2 Nutzung	51

5.2.1	Anpassung der Ladezeit.....	51
5.2.2	Grenzszenario Grüner Strommix.....	52
5.2.3	Diskussion der Ergebnisse	53
5.3	Recycling	54
5.3.1	Lithium Rückgewinnung mittels Pyrometallurgie statt Hydrometallurgische Aufbereitung	55
5.3.2	Weiterverwendung der Lithium-Ionen-Batterie.....	56
5.4	Ganzheitliche Betrachtung	56
5.4.1	Szenario „Normal“.....	56
5.4.2	Szenario „PV-Strom“	57
5.4.3	Szenario „Grüner Strom“	58
6	Auswertung.....	60
6.1	Ergebnisse der Ökobilanz und der Szenarien	60
6.2	Unsicherheiten und Forschungsbedarf	61
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	63
	Anhang	LXIV
	Abbildungsverzeichnis.....	LXV
	Tabellenverzeichnis	LXVI
	Eidesstattliche Erklärung	LXVII
	Literaturangaben	LXVIII

Einleitung

Das erste Elektroauto gab es schon im Jahr 1881, als Gustave Trouvé auf der Elektrizitätsmesse „Exposition Internationale d'Électricité“ seine Erfindung in Paris vorstellte. Jedoch konnte dies nicht mit dem Erfolg der Verbrennungsmotoren konkurrieren. Die Batteriekapazitäten waren schlicht zu gering um gegen die praktisch unbegrenzte Reichweite der konventionellen Fahrzeuge zu bestehen. In Zeiten des Klimawandels hat in den letzten Jahren ein starkes Umdenken in der Bevölkerung und der Politik stattgefunden. Der klimaschädliche Mobilitätssektor soll umstrukturiert werden. Einhergehend mit der Energiewende und der Errichtung erneuerbaren Energieanlagen, welche Kopplungsmöglichkeiten mit der Elektromobilität bieten, soll die Vision eines klimaneutralen Straßenverkehrs umgesetzt werden. Die Bundesregierung fördert den Kauf von Elektroautos, welche bereits viele Automobil Hersteller in ihr Sortiment mit aufgenommen haben, sowie die Errichtung passender Ladeinfrastruktur, um einen entsprechenden Markthochlauf zu generieren. Diese Unternehmung ist bisher jedoch noch nicht erfolgreich gewesen. Das ehrgeizige Ziel der Bundesregierung, dass bis 2020 eine Millionen Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen fahren wird wahrscheinlich nicht erreicht. Die für viele Menschen neue Technik ist noch mit zu vielen Ungewissheiten behaftet. Die derzeit zentrale Frage ist, ob das Elektrofahrzeug wirklich einen ökologischen Vorteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor bietet. Die in Elektrofahrzeugen verbauten Lithium-Ionen-Batterien wirken sich negativ auf die Umwelt aus, da diese einen Mehranteil an seltenen Erden bedingen und es zudem für diese noch keine gängigen Recyclings- und Verwertungsrouten gibt.

Um die Frage zu klären, ob ein Elektrofahrzeug also ökologisch sinnvoller als ein konventionelles Kraftfahrzeug ist, wird in dieser Arbeit ein ökobilanzieller Vergleich zwischen einem Fahrzeugmodell hergestellt, welches es sowohl in einer Ausführung als Elektrofahrzeug, als auch als Benzinern gibt. Die drei Phasen des Lebenszyklus eines Fahrzeuges Herstellung, Nutzung und Recycling werden nach ihren Auswirkungen auf die Umwelt analysiert. Die ökologischen Belastungen der einzelnen Prozessschritte jeder Phase werden untersucht und zusammenfassend dargestellt. In einem anschließenden Vergleich der beiden Fahrzeuge werden die umweltkritischen Prozesse hervorgehoben und Möglichkeiten der ökologischen Verbesserungen dieser Prozesse aufgeschlüsselt.

1 Motivation

1.1 Kenntnisstand

Während fossile Kraftstoffe bei der Verbrennung im Motor umweltschädliche Treibhausgase verursachen, fallen bei batteriebetriebenen Fahrzeugen im lokalen Betrieb eindeutig weniger Emissionen an. Doch es besteht im Allgemeinen kein Konsens darüber, ob Elektroautos insgesamt über die komplette Lebensdauer klimafreundlicher sind als vergleichbare Verbrenner. Bei der Beurteilung der indirekten Emissionen führen verschiedene Bewertungsansätze dabei zu inhomogenen Ergebnissen. Diese Tatsache legitimiert die Anzahl der Studien und Untersuchungen, die akut zum Thema Elektromobilität entstehen. Je nach Studie variieren vor allem die Emissionen der mit Strom betriebenen Fahrzeuge erheblich. Die meisten Ergebnisse belegen, dass die Substitution von Benzin oder Diesel mit Strom nur geringfügig den CO₂-Ausstoß minimiert. Jedoch existieren auch Untersuchungen die dem Elektroauto eine schlechtere Umweltbilanz als dem Verbrenner attestieren. Alles im allem ist die Ausgangslage zum Thema Ökobilanz der Elektromobilität sehr unübersichtlich und nicht homogen. Oft fehlen bei Simulationen wichtige Parameter wie langfristige Untersuchungen der möglichen Deckung des Strombedarfs der Elektroautos aus erneuerbaren Quellen, exakte Aufschlüsselung der Herstellung der Batterie oder volkswirtschaftliche Verflechtungen und Rückkopplungen. Dies begründet die Notwendigkeit der Betrachtung eines konkreten Fahrzeuges unter Berücksichtigung der spezifischen, regionalen Gegebenheiten sowie der politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, um ein aussagekräftiges Ergebnis zum Thema Klimawirkung des Elektroautos in Deutschland erhalten zu können. [2, 3]

1.2 Untersuchungsrahmen

Um das Potential innovativer Elektrostraßenfahrzeugen zu identifizieren, werden in dieser Arbeit die Klimawirkungen eines Elektromobils im Vergleich mit einem Referenzfahrzeugs untersucht. Dabei soll eine Variante eines vollelektrischen Antriebes am Beispiel eines markreifen Modells des Elektrosmart mit konventionell betriebenem Fahrzeug identischer Bauweise verglichen werden. Der Kleinstwagen ist ein populäres Auto in Deutschland, welches aufgrund einer vergleichbar guten Datenbasis eine ausreichende Informationsgrundlage für eine Öko-Bilanz bietet [4]. In dieser Arbeit soll eine vollständige Ökobilanz durchgeführt werden; die sich in drei Phasen einteilen lässt, der Produktherstellung, dem Betrieb und der Entsorgung. Dabei sollen in allen Lebensphasen anfallenden Emissionen einschließlich der linearen sowie indirekten Vorketten, ausgeschlossen wirtschaftlicher Verflechtungen, berücksichtigt werden. Die Methodik der Bilanzierung wird im folgenden Kapitel aufgeschlüsselt. Die Analyse im Betrieb konzentriert sich zunächst auf das Laden ohne steuerbare Maßnahmen, da ein möglichst realistisches Ergebnis widergegeben werden soll. Ebenso wird in dieser Arbeit ein generell konservativer Ansatz einer Bilanzierung verfolgt. Dies wird in einzelne Annahmen, die in zugehörigen Kapiteln der Sachbilanz näher erläutert werden, ersichtlich.

2 Methodik

2.1 Vorgehen bei einer Ökobilanz

Die methodische Vorgehensweise bei einer Ökobilanz ist in der Norm DIN ISE 14044 in Zusammenspiel mit der Norm DIN ISE 14040 klar definiert. Insgesamt besteht eine Ökobilanz aus vier Teilen. Der Definition von Zielen und Systemgrenzen, der Sachbilanz, der Wirkungsabschätzung sowie einer abschließenden Auswertung. Diese Studie orientiert sich an der in den Normen genannten Vorgehensweise. Im Vorfeld sollen die einzelnen Bestandteile einer Ökobilanz definiert werden.

2.1.1 Zielsetzung und Systemgrenzen

Bevor die Datenerhebung beginnen kann muss das Ziel und der Untersuchungsrahmen einer Ökobilanz klar definiert werden. Für die Zielsetzung sind besonders die Fragestellungen nach der beabsichtigten Anwendung, der angesprochenen Zielgruppe, den Gründen für die Durchführung sowie der weiteren Verwendung der Ergebnisse von besonderer Bedeutung.

Auf Grundlage dieser Informationen kann der Untersuchungsrahmen festgelegt werden. Da man eine Ökobilanz beliebig umfangreich gestalten kann, muss vor der Durchführung der Sachbilanz eine Systemgrenze definiert werden. Die Auswahl der Systemgrenze orientiert sich dabei hauptsächlich an der vorher definierten Zielsetzung bzw. der Frage, die beantwortet werden soll. Hier wird der Detailierungsgrad der Studie festgelegt. Des Weiteren bedarf es der Auswahl eines Allokations- und Bewertungsverfahrens. Hierfür müssen Bewertungskriterien definiert werden sowie eine Methode zu Auswertung der gewonnenen Daten gefunden werden. Außerdem werden Anforderungen an die Datenqualität und -quantität in diesem Schritt definiert. Es ist wichtig nur Daten, die den definierten Ansprüchen entsprechen, herauszufiltern und zu verwenden. Andernfalls können die Aussagekraft und Richtigkeit des Ergebnisses vermindert werden.

In diesem Schritt der Ökobilanz wird sich also hauptsächlich auf die anzuwendende Methodik konzentriert. Nach der Definition der wichtigsten Untersuchungsparameter folgt die Sachbilanz.

2.1.2 Sachbilanz

Die Sachbilanzphase wird auf Grundlage der vorher definierten Ziele sowie des Untersuchungsrahmens durchgeführt. Dabei sollte besonderes Augenmerk auf die Vorgehensweise bei der Datenerhebung geworfen werden. Es ist wichtig, dass qualitative und quantitative Daten für jeden Prozess vorhanden sind. Dabei können die Daten auf Messungen, Berechnungen oder plausiblen Schätzungen beruhen. Es ist wichtig die verwendeten Daten möglichst detailliert zu beschreiben und deren Herkunft zu dokumentieren. Abschließend muss eine Validierung der gesammelten Daten stattfinden. Hierzu können beispielsweise vergleichbare Studien herangezogen werden. Allokationsverfahren, also Verfahren zu Verteilung von Energie- oder Stoffströmen auf mehrere Prozesse, müssen den vorher definierten

Bedingungen entsprechen. Grundsätzlich gilt es eine Allokation von Messdaten so gut es geht zu vermeiden.

Grundsätzlich kann sich bei einer Sachbilanz an die Vorgehensweise, der aus der DIN ISE 14011 stammenden Abbildung 1 gehalten werden.

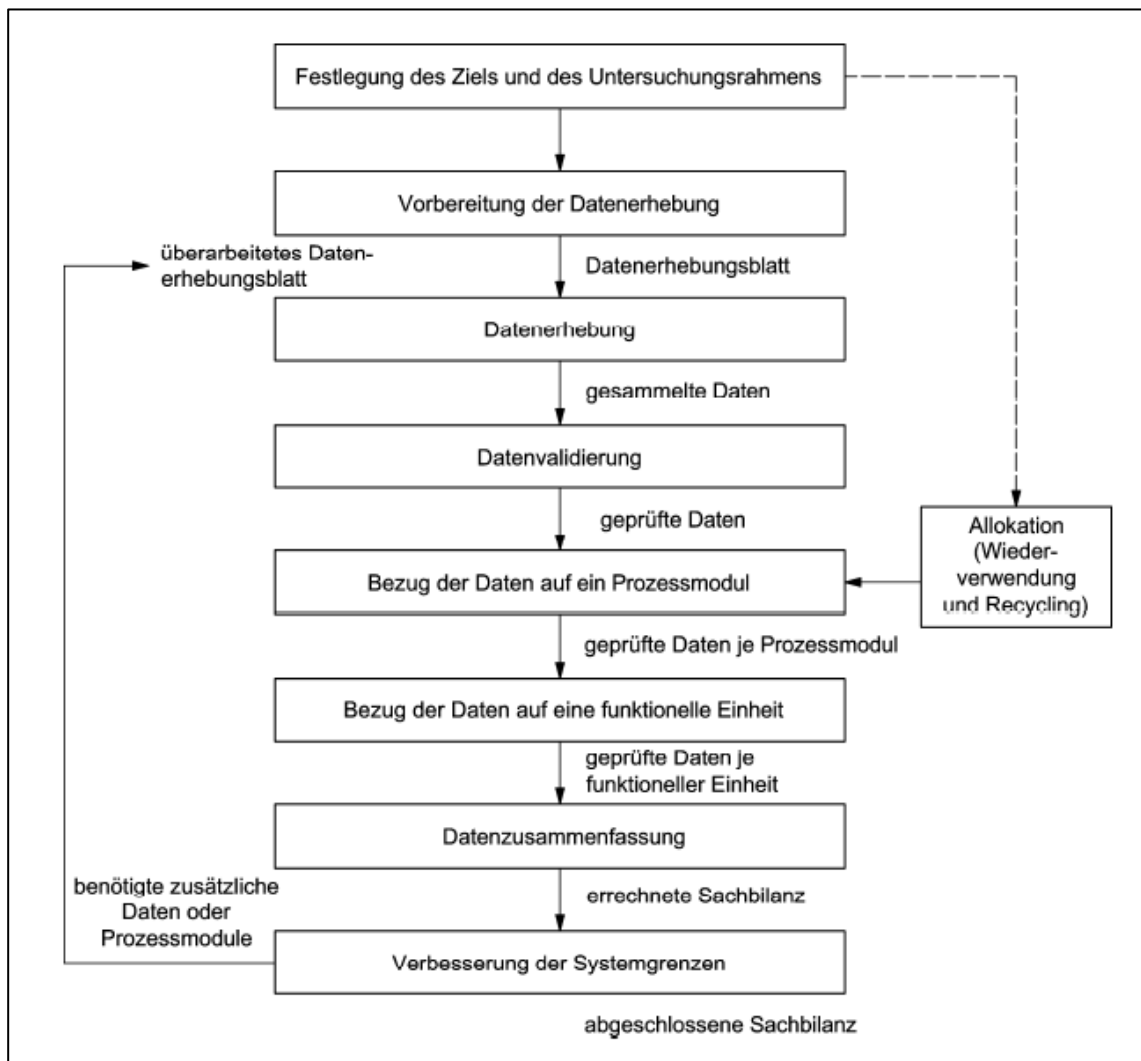


Abbildung 1: Vereinfachtes Verfahren für eine Sachbilanz.

2.1.3 Wirkungsabschätzung

In der Wirkungsabschätzung werden Indikatorwerte definiert und gesammelt, die in Einklang mit den definierten Zielen und dem Untersuchungsrahmen das Wirkungsabschätzungsprofil für das betrachtete Produkt bilden. Hierzu müssen zuerst Wirkungskategorien definiert werden. Diesen Wirkungskategorien werden auf Grundlage der Sachbilanz wiederum einzelne Indikatoren zugeordnet. Die Indikatoren haben Umwelteinflüsse auf die zu definierenden Wirkungsendpunkte. Ein Beispiel für eine solche Wirkungskette kann Abbildung 2 entnommen werden.

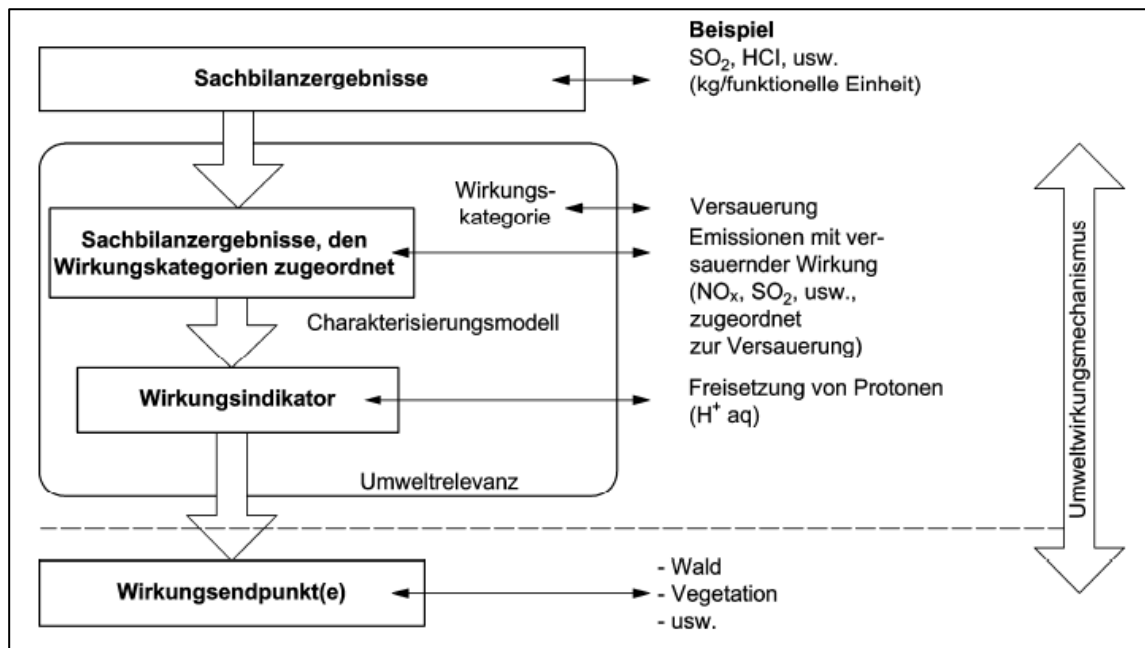


Abbildung 2: Wirkungskette innerhalb einer Wirkungsabschätzung

Bei der Definition von Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren gilt es zu beachten, dass Auswahlverfahren und die Gründe für die festgelegte Definition zu dokumentieren sind.

2.1.4 Auswertung

Die Auswertungsphase einer Ökobilanz soll die in den Zielen definierten Fragestellungen beantworten und die Ergebnisse der Ökobilanz bewerten. Im ersten Schritt müssen hier alle signifikanten Parameter identifiziert werden. Ziel dieser Identifizierung ist es die getroffenen Annahmen, die Datenqualität und -quantität, die Allokationsmethoden, etc. in der nachfolgenden Beurteilung zu berücksichtigen. In der Beurteilung sollen die Ergebnisse schließlich unter Einbezug einer Vollständigkeitsprüfung, einer Sensitivitätsprüfung und einer Konsistenzprüfung bewertet werden. Sie ist in Übereinstimmung mit Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie durchzuführen. Abschließend sollen auf Grundlage der Beurteilung Schlussfolgerungen über die durchgeführte Studie gezogen werden. Außerdem gilt es hier auf Einschränkungen hinzuweisen und Empfehlungen bezüglich weiterem Forschungspotenzial auszusprechen.

Die Zusammenhänge zwischen den drei vorherigen Phasen und der Auswertungsphase einer Ökobilanz sowie deren Bestandteile können der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.

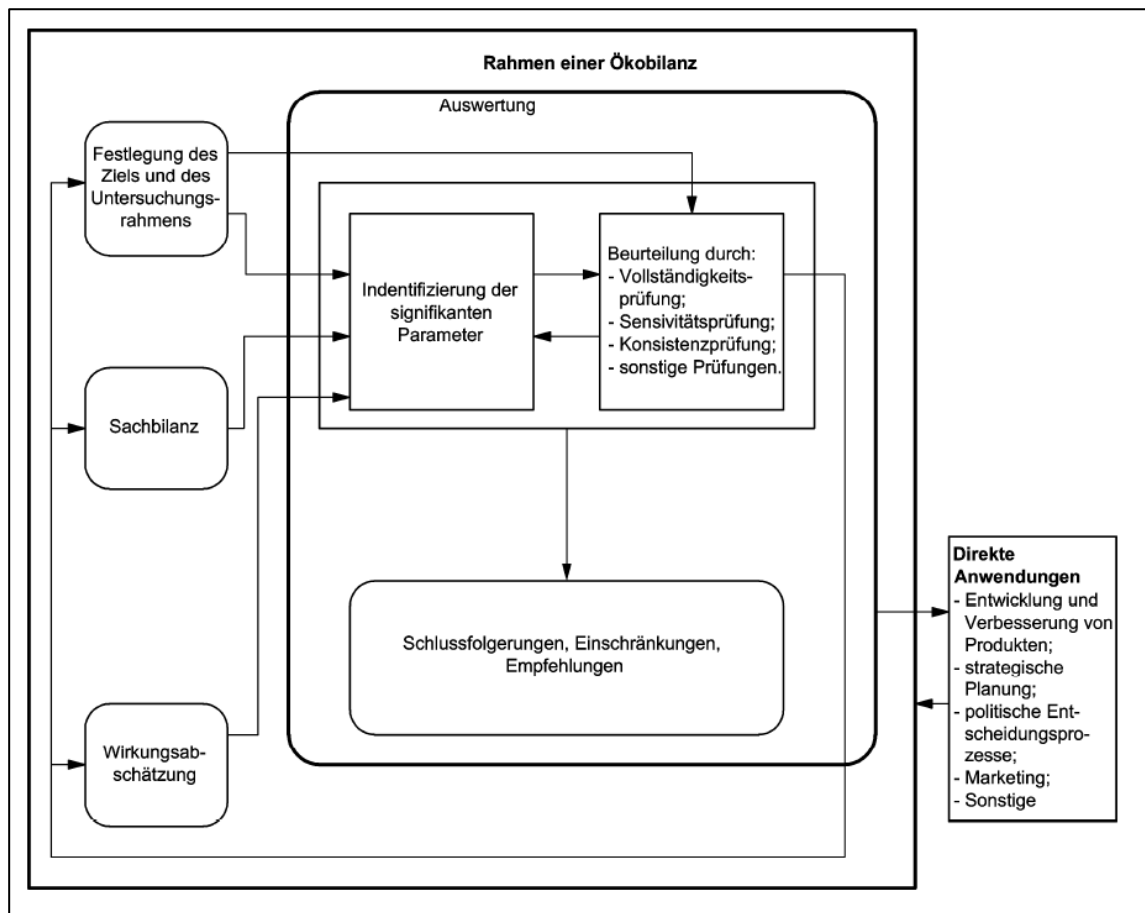


Abbildung 3: Beziehungen zwischen Auswertungsphase und den anderen Phasen einer Ökobilanz

2.2 Verwendete Datenquellen

Die Problematik bei der Durchführung einer Ökobilanz liegt in den meisten Fällen in der Datenbeschaffung. Daten über aufgewandte Energie- und Materialströme während eines Prozesses sind von den unterschiedlichen Firmen nur sehr selten zu erhalten. Dementsprechend beruht der Großteil der verwendeten Daten auf bereits durchgeführten Ökobilanzen und auf eigenen Simulationen. Für die Herstellung beispielsweise wurde die Ökobilanzsoftware GaBi herangezogen, auf die später noch einmal genauer eingegangen wird. Außerdem wurde der Betrieb anhand einer Excel-Simulation modelliert. Hierbei wurden die meisten Daten von offiziellen Einrichtungen wie dem statistischen Bundesamt herangezogen. So konnte gewährleistet werden, dass keine Daten von befangenen Interessensgruppen verwendet wurden. Es hat sich als problematisch herausgestellt aktuelle Daten von vielen Prozessen zu erhalten, ohne dabei Kosten entstehen zu lassen.

Ökobilanz des SMARTs

3 Zielsetzung und Systemgrenzen

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Herstellung eines aussagenkräftigen Vergleiches zwischen einem nahezu baugleichen Elektrofahrzeug und konventionellen Fahrzeugen im Rahmen ihrer Ökobilanz. Die drei Phasen des Lebenszyklus eines Produktes Herstellung, Nutzung und Recycling/Entsorgung werden entlang ihrer Prozesskette auf ihre Einflüsse auf die Umwelt untersucht. Anschließend wird betrachtet, welches Fahrzeug eine bessere Ökobilanz aufweist und die Gründe dafür werden analysiert. Je nach Verfügbarkeit von entsprechenden Datengrundlagen wurden in der Ökobilanz der Fahrzeuge somit die Systemgrenzen, Abbildung 4: Systemgrenzen der Ökobilanz (Eigene Darstellung), nach „from cradle to grave“ ausgelegt. Große Betrachtung dabei wurde der Aufschlüsselung der Unterschiede zwischen den Fahrzeugvarianten hervorzuheben. So wurden im Kapitel Recycling die für ein Elektrofahrzeug notwendige Leistungselektronik und Batterie getrennt vom restlichen Fahrzeug untersucht. Der übrige Teil des Elektrofahrzeuges wurde entsprechend der auch für konventionelle Fahrzeuge gängige Altfahrzeugsverwertungsroute zugeführt.

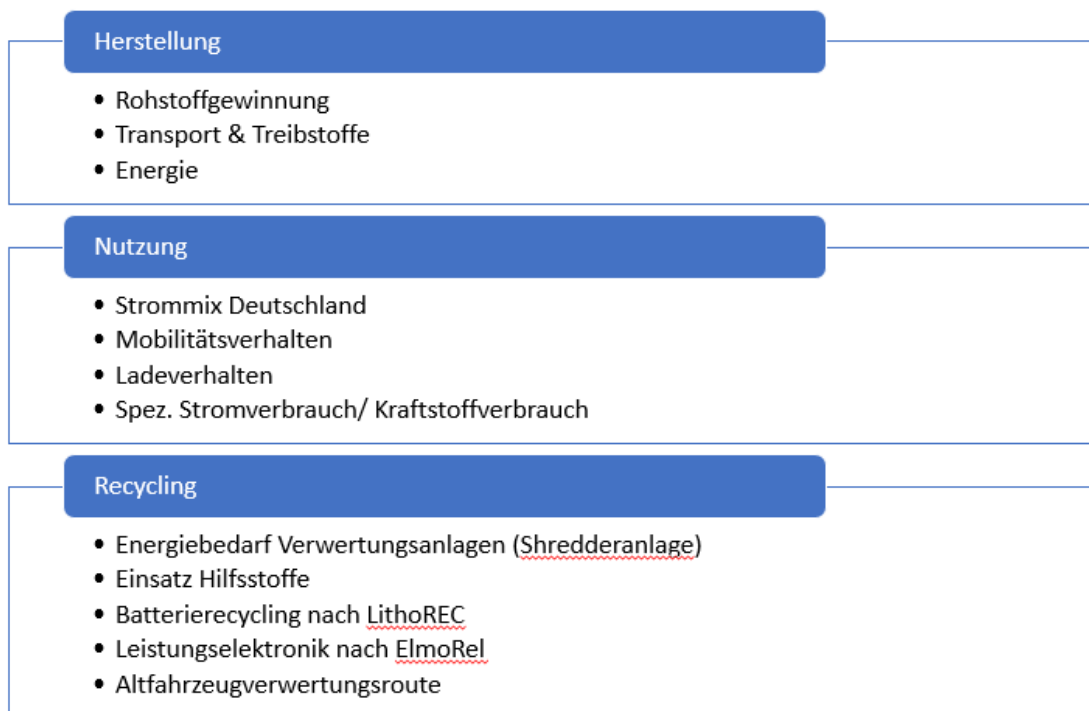


Abbildung 4: Systemgrenzen der Ökobilanz (Eigene Darstellung)

4 Sachbilanz

4.1 Produktherstellung

Die erste Phase innerhalb des Produktlebenszyklus beschreibt die Herstellung der Einzelteile sowie deren Zusammenführung zum fertigen Produkt. Hierbei spielt auch die Rohstoffgewinnung eine entscheidende Rolle. Je nach Extraktionsverfahren und Abbauort der Rohstoffe variiert die Ökobilanz der Produkteinzelteile stark. Auch das Verarbeitungsland und dessen Strommix wird in der nachfolgenden Betrachtung berücksichtigt.

4.1.1 GaBi

Um die Quelle für die nachfolgende Untersuchung der Herstellungsphase des Produktes möglichst einheitlich zu gestalten wurde GaBi herangezogen. Hierbei handelt es sich um eine Software zur Ökobilanzierung von der deutschen Firma thinkstep. Diese bietet unterschiedliche Datenbanken zur Implementierung in GaBi an. Für die betrachtete Untersuchung wurde die Datenbank „Education Database 2017“ verwendet.

Mit Hilfe von in der Datenbank definierten Prozessen kann die Herstellung sowie der Transport einzelner Teile des Fahrzeuges simuliert werden. Hierzu ist für jede Teilkomponente ein einzelnes System erstellt worden, dass im Anschluss auf seine ökologischen Folgen ausgewertet werden kann. Der Herstellungsprozess wird durch einzelne Prozesse dargestellt. Diese spiegeln einzelne technische Prozeduren oder Gruppen von Prozeduren wieder. Ein Prozess, der beispielsweise ein Werkstück beschreibt, beinhaltet automatisch auch Daten über die Herstellung dieses Werkstückes. Darunter finden sich auch Daten über die Gewinnung des jeweiligen Rohstoffes. Dabei werden teilweise sogar unterschiedliche Förderungstechniken berücksichtigt und aufgeschlüsselt aus welchen Ländern der Rohstoff bezogen wird.

Die Prozesse wiederum bestehen aus sogenannten „Flows“. Diese beschreiben tatsächliche Material- oder Energieströme zwischen den einzelnen Prozessen. Auch hier gibt es von GaBi vordefinierte Flows, die jeweils als Input-Flow oder Output-Flow klassifiziert sind. Diese Flows sind in den jeweiligen Prozessen der verwendeten Datenbank definiert. Die Energie- und Stoffströme wurden dabei auf Grundlage von ausführlichen Untersuchungen und Testmessungen verschiedenster Institutionen, die mit thinkstep zusammenarbeiten, gesammelt.

Mit Hilfe dieser Prozesse und den darin definierten Flows kann der Herstellungsprozess des betrachteten Smarts rekonstruiert werden. So kann außerdem der Prozess der Rohstoffgewinnung abgebildet werden.

4.1.2 Elektro-SMART

Da sich Elektroauto und Benziner des betrachteten Smarts in den meisten Komponenten unterscheiden, werden beide Varianten separat voneinander betrachtet. Der Elektro-Smart zeichnet sich durch seine Lithium-Ionen-Batterie sowie den angeschlossenen Elektromotor mit dazugehörigem PowerpAC aus. Letzteres beinhaltet alle Komponenten, die für die Motorsteuerung benötigt werden. Um die Funktionalität des Autos zu gewährleisten benötigt man

außerdem einen Antriebsstrang, welcher ebenfalls von der Ausführung im Benzin-Smart abweicht. Zusätzlich wird die Lade- bzw. Entladeelektronik, bestehend aus dem zugehörigen Ladegerät sowie dem Batterie-Management-System, untersucht. Lediglich Fahrgestell, Karosserie und die verbaute Bleibatterie lassen sich auf sowohl Elektro- als auch Benzinversion des Smarts anwenden. Im Folgenden werden die einzelnen Betrachtungseinheiten auf ihre Materialzusammensetzung sowie -verarbeitung untersucht und mit Hilfe von GaBi bezüglich ihrer Umwelteinflüsse simuliert.

Um den Herstellungsprozess so genau wie möglich konstruieren zu können, muss eine Materialaufstellung der verbauten Teile herangezogen werden. Diese wurde [5] entnommen und wird für die entsprechende Komponente in den folgenden Kapiteln genauer aufgelistet. Auch die Angaben über die Herstellungsorte der jeweiligen Komponenten wurden der genannten Quelle entnommen. Die Bilanzierung eines Smarts mit elektrischem Antrieb empfiehlt sich dadurch, dass die verwendeten Komponenten in fast allen Elektrofahrzeugen verbaut sind. Lediglich die Ausmaße der Komponenten variiert. Dementsprechend kann das hergestellte Modell in GaBi auf alle größeren Elektrofahrzeuge angewandt werden.

4.1.2.1 Lithium-Ionen-Batterie

Der wohl wichtigste Teil eines Elektrofahrzeuges ist die Batterie. Der momentane Standard in der Fahrzeugindustrie sowie in vielen anderen Gebieten der Technik ist die Lithium-Ionen-Batterie.

Die Lithium-Ionen-Batterie des untersuchten Elektro-Smarts besteht zum Großteil aus Metallen wie Kupfer, Aluminium, Graphit oder Eisensulfat. Aber auch Kunststoffe wie Polyethylen oder Polypropylen werden in einer solchen Batterie verbaut. Um den elektrochemischen Lade- und Entladeprozess ablaufen lassen zu können, bedarf es noch einiger Chemikalien wie Lithiumhydroxid, Lithiumhexafluorophosphat oder Kohlenstoff. Mit einem Gewicht von 150 kg macht die Batterie einen nennenswerten Anteil am Gesamtgewicht des Fahrzeuges aus. Die in [5] aufgeführten prozentualen Anteile der jeweiligen Stoffe am Gewicht der Batterie werden zunächst in reelle Gewichtsangaben umgerechnet. Der daraus resultierende Aufbau der Lithium-Ionen-Batterie lässt sich der folgenden Tabelle entnehmen.

Tabelle 1: In Lithium-Ionen-Batterie verbaute Materialien

Material	Materialanteil	Gewicht
Ethylenn碳酸	12,8 %	19,2 kg
N-methyl-2-pyrrolidone	11,2 %	16,8 kg
Kupfer	10,1 %	15,2 kg
Graphit	9,2 %	13,8 kg
Eisensulfat	8,5 %	12,8 kg
Phosphorsäure	5,5 %	8,3 kg
Lithiumhydroxid	3,9 %	5,9 kg
Polytetrafluorethylen	2,9 %	4,4 kg
Polyethylen	2,0 %	3,0 kg
Polypropylen	2,0 %	3,0 kg
Lithiumhexafluorophosphat	1,8 %	2,7 kg
Kohlenstoff	1,5 %	2,3 kg

Aluminium	28,7 %	43,1 kg
-----------	--------	---------

Für die Herstellung des Aluminiums wurde der Prozess „Aluminium Sheet mix“ herangezogen. Dieser Prozess beinhaltet alle Energie- und Stoffströme, die zur Herstellung von Aluminiumblechen benötigt werden. Hier werden auch die Rohstoffgewinnung und der Transport in das Verarbeitungsland sowie die beim Herstellungsprozess anfallenden Energieströme berücksichtigt. Unter anderem wird z.B. der Walzprozess mit in die Betrachtung einbezogen. Um aus den Aluminiumblechen fertige Einzelteile zu gewinnen wird der Stanzprozess „Aluminium sheet deep drawing“ in das System integriert. Da die Batterie in China hergestellt wird, soll auch die für den Stanzprozess verwendete elektrische Energie dem chinesischen Strommix entsprechen. Dies geschieht durch die Verwendung des Prozesses „CH: Electricity grid mix“. Der Prozess orientiert sich an den in China typischen Kraftwerkstypen und dem aktuellen Strommix im chinesischen Netz. Der Wert für die emittierte Masse CO₂-Äquivalenz pro verbrauchter kWh elektrischer Energie aus dem chinesischen Strommix wurde dabei [6] entnommen und beträgt ca. 1 kg CO₂-Äquivalenz / kWh_{el}. Alle weiteren Anwendungen, für die elektrische Energie benötigt wird, sind auch mit diesem Prozess verbunden.

Um die Verwendung von Kupfer in der Lithium-Ionen-Batterie zu integrieren wird der Prozess „Copper mix“ verwendet. Dieser beschreibt den Herstellungsprozess von Kupfer durch Elektrolyse. Um die Bearbeitung des gewonnenen Kupfers zu simulieren wurde der Prozess „Metal roll forming“ herangezogen. Dieser wurde im Folgenden bei vielen metallverarbeitenden Prozessen verwendet, da die genutzte Datenbank oftmals keine metall- und anwendungsspezifischen Verarbeitungsprozesse beinhaltet.

Das verwendete Graphit wurde durch den Prozess „Graphite baking“ in das System integriert. Die für den Prozess benötigte thermische Energie wird mit Hilfe von Erdgas zur Verfügung gestellt. Auch hier werden lokale Gegebenheiten wie die landesspezifische Erdgaszusammensetzung, dessen Herkunft und die Verwertung im betrachteten Land China berücksichtigt. Der dazugehörige Prozess ist „CH: Thermal energy from natural gas“.

Der verbauten Kunststoffe werden mit Hilfe des Prozesses „Polyethylene High Density Granulate Mix“ berücksichtigt. Auch hier werden alle Energie und Materialflüsse bei der Herstellung des fertigen Granulats berücksichtigt. Um die Bearbeitung des Granulats zu simulieren, wird der Prozess „Plastic injection moulding part (unspecific)“ herangezogen. Die meisten der in einer Lithium-Ionen-Batterie zum Einsatz kommenden Plastikteile entspringen dem sogenannten Spritzgussverfahren, welches durch den genannten Prozess wiedergespiegelt wird. In dem genannten Prozess sind mit Ausnahme von Polypropylen alle verwendeten Plastikbestandteile inbegriffen. Für Polypropylen wurde eine identische Prozesskette bestehend aus dem Granulat und der Verarbeitung durch das Spritzgussverfahren angelegt. Die für beide Prozessketten verwendete thermische Energie entspringt ebenfalls dem Prozess „CH: Thermal energy from natural gas“.

Die Herstellung und Verarbeitung der Chemikalien konnten aufgrund fehlender Daten nicht genau modelliert werden. Annähern kann man sich den restlichen Prozessen durch Zuhilfenahme von [7]. Hier werden die Herstellung und die Verarbeitung der in einer Lithium-Ionen-Batterie verwendeten Chemikalien bilanziert. Insgesamt wird für die Herstellung der restlichen Chemikalien und nicht berücksichtigten Bestandteile 68 MJ elektrische Energie und ca.

1.400 MJ thermische Energie aufgewandt. Die genannten Energieströme können wiederum durch die Prozesse zur Simulation des chinesischen Strommixes sowie thermischer Energie aus Erdgas berücksichtigt werden.

Für den Transport der Batterie wurde eine Transportstrecke von dem Herstellungsort Luo-yang in China bis zum Smart-Werk im französischen Hambach mittels SeaRates LP angenommen. Diese besteht aus ca. 1.500 km Strecke an Land und einem Schiffstransport von ca. 19.400 km. Zur Simulation des Dieselverbrauches wurde für die auf der Straße zurückzulegende Strecke der Prozess „GLO: Truck, EURO 4, 20 – 26t gross weight/ 17,3t payload capacity“ verwendet. Dieser spiegelt den Verbrauch eines Trucks mit ca. 17t Ladekapazität wieder, wie er oftmals in der Logistik verwendet wird. Für den Seeweg wurde der Prozess „GLO: Bulk commodity carrier, average, ocean going“ verwendet, welcher ein Containerfrachtschiff darstellt. Der jeweilige Bedarf an Diesel bzw. Schweröl wurde mittels der Prozesse „Diesel mix at refinery“ und „Heavy fuel oil at refinery“ simuliert. Der genaue Systemaufbau kann der folgenden Abbildung entnommen werden.

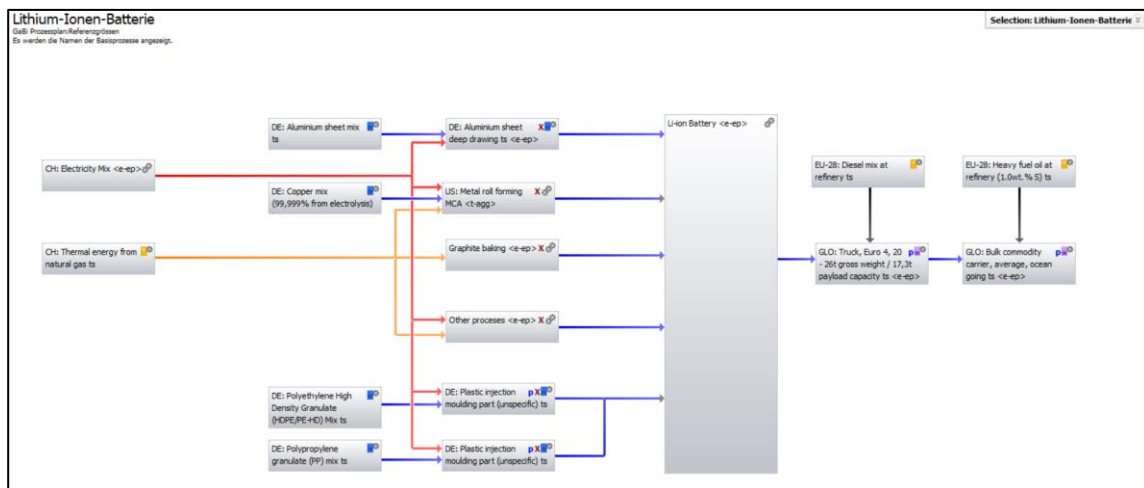


Abbildung 5: GaBi Systemaufbau Lithium-Ionen-Batterie

Material- und Stoffströme sind dabei blau markiert. Der Strom von thermischer Energie hingegen wird gelb dargestellt, der Strom von elektrischer Energie wiederum rot. Diese Darstellungsweise wurde auf die nachfolgenden Systembeschreibungen ebenfalls angewandt.

4.1.2.2 Elektromotor

Im Gegensatz zum Benzin-Smart besitzt das betrachtete Elektrofahrzeug einen Elektromotor statt einem herkömmlichen Verbrennungsmotor. Dieser besteht fast ausschließlich aus den Metallen Eisen, Aluminium und Kupfer. Außerdem werden in dem betrachteten Motor einige Teile aus Polyethylen verbaut. Die genaue Gewichtsaufteilung des 58 kg schweren Elektromotors kann der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 2: In Elektromotor verbaute Materialien

Material	Materialanteil	Gewicht
Eisen	58 %	33,6 kg
Aluminium	20 %	11,6 kg
Kupfer	20 %	11,6 kg

Polyethylen	2 %	1,2 kg
-------------	-----	--------

Bei den in einem Elektromotor verbauten Aluminiumteilen handelt es sich größtenteils um massive Bestandteile, die aus Gussblöcken ausgearbeitet werden [8]. Hierfür werden Techniken wie das Drehen oder Bohren sowie viele andere Arbeiten am massiven Aluminiumblock angewandt. Der in GaBi verwendete Prozess für solche Arbeiten ist „Aluminium cast machining“. Die Herstellung des dafür benötigten Aluminiumblockes wird mit Hilfe des Prozesses „Aluminium ingot mix“ simuliert. Da der betrachtete Elektromotor in Italien hergestellt wird, soll die elektrische Prozessenergie dem italienischen Strommix entspringen. Dafür wurde der Prozess „IT: Electricity mix“ verwendet. Die verwendete Referenzgröße für den Ausstoß von CO₂-Äquivalent bei dem Bezug einer kWh elektrischer Energie aus dem italienischen Strommix wurde [9] entnommen. Sie beläuft sich auf 0,708 kg CO₂-Äquivalent/ kWh_{el}.

Für die Simulation des verwendeten Eisens wurde der Prozess „Cast iron part (automotiv)“ herangezogen und beschreibt die Herstellung von Automobilteilen aus Gusseisen. Der Prozess wurde dabei auf der Grundlage von Daten erstellt, die direkt aus der Automobilbranche stammen. Der genannte Prozess benötigt elektrische Energie, die wiederum dem vorher beschriebenen Prozess zur Simulation des italienischen Strommixes entspringt. Neben der elektrischen Energie wird aber auch thermische Energie benötigt. Diese entstammt dem Prozess „IT: Thermal energy from natural gas“. Auch hier wurde sich wieder an die lokalen Eigenschaften des Erdgases für den Standort Italien gehalten. Der Bearbeitungsprozess des verwendeten Eisens wurde mithilfe des Prozesses „Metal roll forming“ simuliert. Auch die während des Verarbeitungsprozesses benötigte thermische und elektrische Energie wird mittels der vorher beschriebenen Module simuliert.

Das verwendete Kupfer wurde erneut durch den Prozess „Copper mix“ simuliert. Auch hier findet der Prozess „Metal roll forming“ zur Simulation der weiteren Metallbearbeitung Anwendung.

Die Bestandteile aus Plastik wurden wie im vorherigen Abschnitt erläutert mit Hilfe der Prozesse „Polyethylene High Density Granulate“ und „Plastic injection moulding part (unspecific)“ modelliert. Die dafür benötigte elektrische Energie entspringt erneut dem Prozess „IT: Electricity Mix“.

Die Transportstrecke des fertigen Elektromotors beträgt insgesamt 616 km. Dieser Wert entspricht der Strecke zwischen dem Herstellungsort im italienischen Liscante und dem Smart-Werk in Hambach. Für die Distanzermittlung wurde Google Maps herangezogen. Der Transport des Motors wurde mit Hilfe des Prozesses „GLO: Truck, EURO 4, 20 – 26t gross weight/ 17,3t payload capacity“ simuliert. Der dazugehörige Dieserverbrauch über die Transportstrecke wird durch den Prozess „EU-28: Diesel mix at refinery“ beschrieben. Der exakte Aufbau des Systems kann Abbildung 5 entnommen werden.

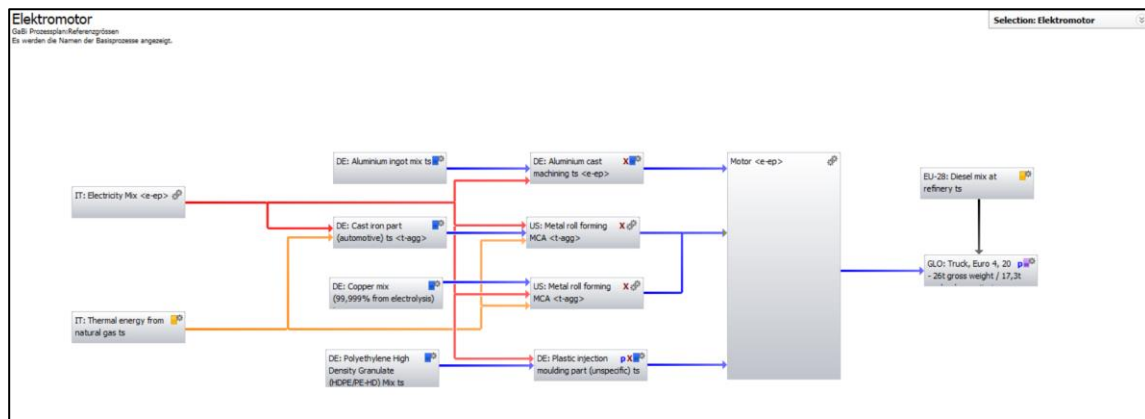


Abbildung 6: GaBi Systemaufbau Elektromotor

4.1.2.3 Ladegerät

Auch das Ladegerät ist ein wichtiger Bestandteil des Elektrofahrzeuges. Zwar ist es nicht direkt im Smart verbaut, stellt aber eine wesentliche Komponente für dessen Benutzung dar und wird deswegen mit bilanziert. Das Ladegerät an sich wiegt insgesamt 10 kg und besteht aus den in der nachfolgenden Tabelle aufgelisteten Materialien.

Tabelle 3: In Ladegerät verbaute Materialien

Material	Materialanteil	Gewicht
Aluminium	49,8 %	4,98 kg
Ferrite	12,1 %	1,21 kg
Kupfer	11,7 %	1,17 kg
Stahl	8,4 %	0,84 kg
Leiterplatten	6,9 %	0,69 kg
Kondensator	5,5 %	0,55 kg
Kunststoffe	3,9 %	0,39 kg
Messing	1,6 %	0,16 kg
Keramik	0,1 %	0,01 kg

Für die Simulation des Aluminiums werden die bekannten Prozesse „Aluminium Ingot mix“ und „Aluminium cast machining“ verwendet. Die benötigte elektrische Energie entstammt dabei dem Prozess zur Simulation des chinesischen Strommixes, da das betrachtete Bauteil aus China stammt. Auch für Kupfer und alle Plastikeile sind die bereits im Vorfeld erwähnten Prozesse „Copper mix“, „Metal roll forming“, „Polyethylene high Density Granulate“ sowie „Plastic injection moulding part (unspecific)“ verwendet worden. Leiterplatte und Kondensator sind dabei den Prozessen für die Plastik- bzw. Kupferherstellung zugeordnet worden.

Für die verwendeten Bestandteile aus Stahl wurde der Prozess „Steel cold rolled coil“ verwendet. Dieser beschreibt die Material- und Energieströme bei der Herstellung von Stahl. Auch die Rohstoffgewinnung sowie dessen Transport sind in dem verwendeten Prozess berücksichtigt. Eine für den Produktionsstandort China passende Angabe konnte der vorhandenen Datenbank nicht entnommen werden. Um den Bearbeitungsprozess des verwendeten Stahls zu simulieren wurde der Prozess „Steel sheet stamping and bending“ verwendet.

Die verbauten Bestandteile aus Messing wurden mittels des Prozesses „Red brass“ simuliert. Dieser beschreibt die Herstellung des verbauten Metalls. Der anschließende Metallbearbeitungsprozess wurde erneut mittels des Prozesses „Metal roll forming“ simuliert. Die dafür benötigte elektrische und thermische Energie entspringen den Prozessen „CH: Electricity Mix“ und „CH: Thermal energy from natural gas“. Durch die Verwendung der genannten Prozesse wird die landesspezifische Zusammensetzung der jeweiligen Energieformen berücksichtigt.

Leider konnten die im Ladegerät verbauten Materialien Keramik und Ferrite mit der verwendeten Datenbank nicht simuliert werden. Da es sich bei dem Ladegerät aber um ein vergleichbar kleines System handelt, ist der dadurch auftretende Fehler sehr gering. Außerdem machen die nicht simulierten Bestandteile nur einen geringen Anteil des Gesamtgewichtes aus.

Mittels des bekannten Tools SeaRates LP wurde eine Transportstrecke vom Herstellungsort in Hangzhou bis zum Smart-Werk in Hambach erstellt. Diese besteht aus ca. 19.200 km Seeweg und 580 km Transport über die Straße. Zur Simulation des Transportes wurden die bekannten Prozesse zur Simulation eines Lastkraftwagens, eines Containerfrachtschiffes und die dazugehörigen Prozesse für Diesel- und Schwerölverbrauch verwendet. Der Aufbau des Systems ist in Abbildung 7 dargestellt.

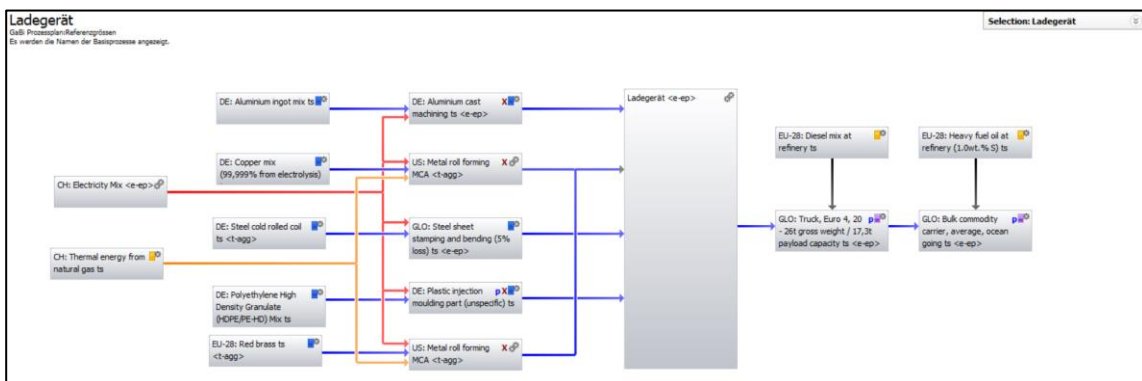


Abbildung 7: GaBi Systemaufbau Ladegerät

4.1.2.4 PowerpAC

Das PowerpAC beschreibt alle Bestandteile innerhalb des elektrischen Antriebsmechanismus neben der Lithium-Ionen-Batterie und dem Elektromotor selbst. Hierunter fallen Systemkomponenten wie der Wechselrichter, der Spannungswandler und die Motorsteuerung. Aufgrund der Tatsache, dass so viele einzelnen Bestandteile in diesem System zusammengefasst werden, macht es mit 23 kg einen nicht zu vernachlässigenden Anteil des Fahrzeuggewichtes aus. Die Materialzusammensetzung des untersuchten Systems kann Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: In PowerpAC verbaute Materialien

Material	Materialanteil	Gewicht
Aluminium	51,9 %	11,94 kg
Kupfer	16,1 %	3,70 kg
Leiterplatten	8,6 %	1,98 kg
Kondensator	5,7 %	1,31 kg

Ferrite	4,5 %	1,04 kg
Stahl	4,7 %	1,08 kg
Messing	3,8 %	0,87 kg
Kunststoffe	3,5 %	0,81 kg
Keramik	0,9 %	0,21 kg
Widerstand	0,2 %	0,05 kg

Bedingt durch die Tatsache, dass viele der im PowerpAC enthaltenen elektrischen Komponenten auch im Ladegerät vorkommen, ähneln sich die Materialzusammensetzungen der beiden Systeme sehr. Dementsprechend wurden auch die meisten Prozesse des Systems „Ladegerät“ in diesem System wiederverwendet. Da das PowerpAC ebenso wie der Elektromotor in Italien hergestellt wird, muss die verwendete elektrische Energie dem italienischen Strommix entspringen. Das gleiche gilt für die verwendete thermische Energie. Deshalb werden erneut die Prozesse „IT: Electricity mix“ und „IT: Thermal energy from natural gas“ herangezogen.

Für Kupfer, Aluminium, Messing und Stahl wurden die gleichen Prozesse wie im System „Ladegerät“ verwendet. Auch die Prozesse zur Simulation von Bestandteilen aus Plastik haben hier erneut Anwendung gefunden. Die Leiterplatten sind in dem Prozess „Plastic injection moulding part (unspecific)“ berücksichtigt worden. Lediglich Keramik, Ferrite und der Widerstand konnten aufgrund fehlender Prozesse mit der verwendeten Datenbank nicht modelliert werden. Auch hier ist der Materialanteil aber vergleichbar gering, was einen möglichen Fehler sehr gering ausfallen lässt.

Der Transport des fertigen PowerpACs aus dem italienischen Bergamo nach Hambach wird mittels der Prozesse zur Simulation eines Lastkraftwagens sowie dessen Dieserverbrauches dargestellt. Insgesamt beträgt die mittels Google Maps ermittelte Transportstrecke ca. 680 km. Der Aufbau des Systems mit all seinen Komponenten ist in Abbildung 8 dargestellt.

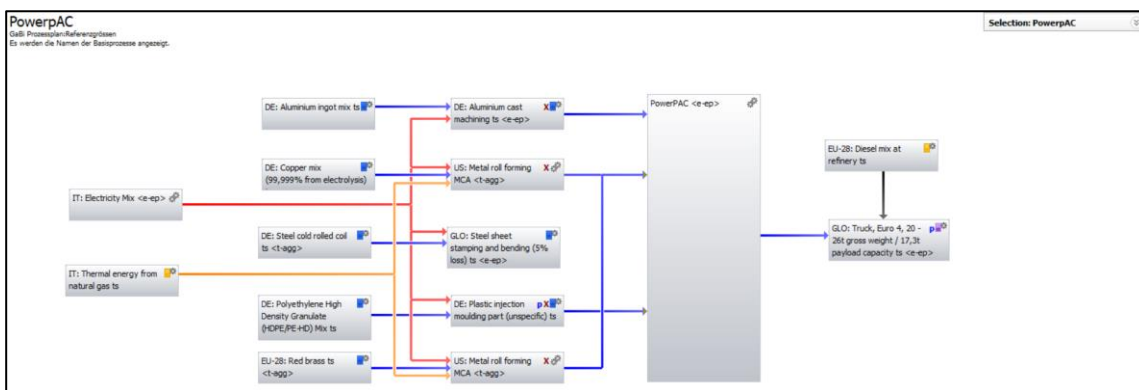


Abbildung 8: GaBi Systemaufbau PowerpAC

4.1.2.5 Batterie-Management-System

Das Batterie-Management-System gehört zu einem der kleinsten Bestandteile des untersuchten Elektro-Smarts, spielt aber gleichzeitig eine nicht unwesentliche Rolle für den Betrieb des Elektrofahrzeugs. Durch die untersuchte Komponente wird das Lade- und Entladeverhalten der Lithium-Ionen-Batterie gesteuert. Es sorgt dafür, dass alle Zellen möglichst gleichmäßig beladen und entladen werden. So wird die Zelllebensdauer deutlich erhöht. Insgesamt

macht es mit 2,6 kg nur einen relativ unerheblichen Anteil des Gesamtgewichtes aus. Es besteht zu 60 % aus Kupfer und zu 40 % aus Edelstahl.

Die Herstellung und die Verarbeitung der beiden Materialien werden, wie im Vorfeld bereits angewandt, durch die Prozesse „Copper Mix“, „Metal roll forming“, „Steel cold rolled coil“ und „Steel stamping and bending“ simuliert. Elektrische und thermische Energie werden durch die Verwendung der Prozesse „CH: Electricity Mix“ und „CH: Thermal energy from natural gas“ modelliert, welche die lokalen Gegebenheiten der Energiewandlung berücksichtigen.

Der Transport des Batterie-Management-Systems aus dem chinesischen Harbin bis nach Hambach in Frankreich wird mittels der Prozesse zur Simulation von Lastkraftwagen und Containerschiffen modelliert. Insgesamt muss eine Strecke von ca. 1.550 km auf der Straße und ca. 19.600 km auf dem Seeweg zurückgelegt werden. Der genaue Aufbau des so entworfenen Systems kann der Abbildung 9 entnommen werden.

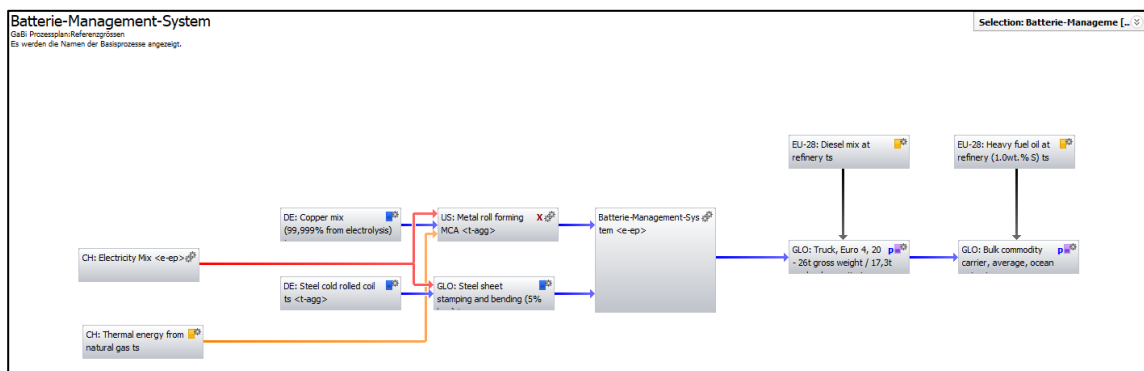


Abbildung 9: GaBi Systemaufbau Batterie-Management-System

4.1.2.6 Antriebsstrang Elektro-SMART

Viele der Bauteile, die für den Betrieb eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor unerlässlich sind, finden in einem Elektrofahrzeug keine Anwendung. Eine Kardanwelle beispielsweise wie sie bei heckangetriebenen oder allradfähigen Autos Anwendung findet, wird in einem Elektrofahrzeug nicht benötigt. Die Rotationsenergie des Elektromotors wird dabei meist über ein einfaches Getriebe direkt an die Antriebsräder weitergegeben. Bei den im System „Antriebsstrang“ betrachteten Komponenten handelt es sich um mehrere Einzelteile, die ein Gesamtgewicht von 19,3 kg aufweisen. Die genaue Materialzusammensetzung kann der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 5: In Antriebsstrang verbaute Materialien

Material	Materialanteil	Gewicht
Aluminium	57,8 %	11,16 kg
Stahl	15,8 %	3,05 kg
Kupfer	7,3 %	1,41 kg
Gusseisen	2,1 %	0,41 kg
Messing	0,1 %	0,02 kg
Polyethylen	13,8 %	2,66 kg
Gummi	2,5 %	0,48 kg
Carbon	0,4 %	0,08 kg
Bariumtitanat	0,3 %	0,06 kg

Es fällt auf, dass die drei Hauptbestandteile des Antriebsstranges Aluminium, Stahl und Kupfer sind. Aluminium macht dabei den größten Anteil aus. Da es sich bei den Bestandteilen aus Aluminium um aus einem Aluminiumblock gefertigte Werkstücke handelt, können auch hier wieder die bekannten Prozesse „Aluminium Ingot mix“ und „Aluminium cast machining“ verwendet werden. Auch die Prozesse für die Bestandteile Stahl, Kupfer, Gusseisen, Messing und Polyethylen entsprechen den im Vorfeld verwendeten Blöcken.

Lediglich das im Antriebsstrang verwendete Gummi wurde im Vorfeld noch nicht simuliert. Hierfür wurde der Prozess „Styrene-Butadiene Rubber (SBR)“ verwendet. Dieser beschreibt die Herstellung von Styrol-Butadien-Kautschuk, bei dem es sich um den Ausgangsstoff für die Herstellung von synthetischem Gummi handelt. Leider konnte der gegebenen Datenbank kein weiterer Verarbeitungsprozess des Gummis entnommen werden.

Die Bestandteile aus Carbon und Bariumtitanat konnten nicht simuliert werden, da vergleichbare Prozesse nicht in der verwendeten Datenbank vorhanden waren.

Für den Transport des Antriebsstranges wurde [5] eine Transportdistanz von ca. 400 km Straßentransport entnommen, welcher durch die bekannten Prozesse „GLO: Truck, EURO 4, 20 – 26t gross weight/ 17,3t payload capacity“ und „EU-28: Diesel mix at refinery“ modelliert wurden. Der Aufbau des so erstellten Systems kann Abbildung 10 entnommen werden.

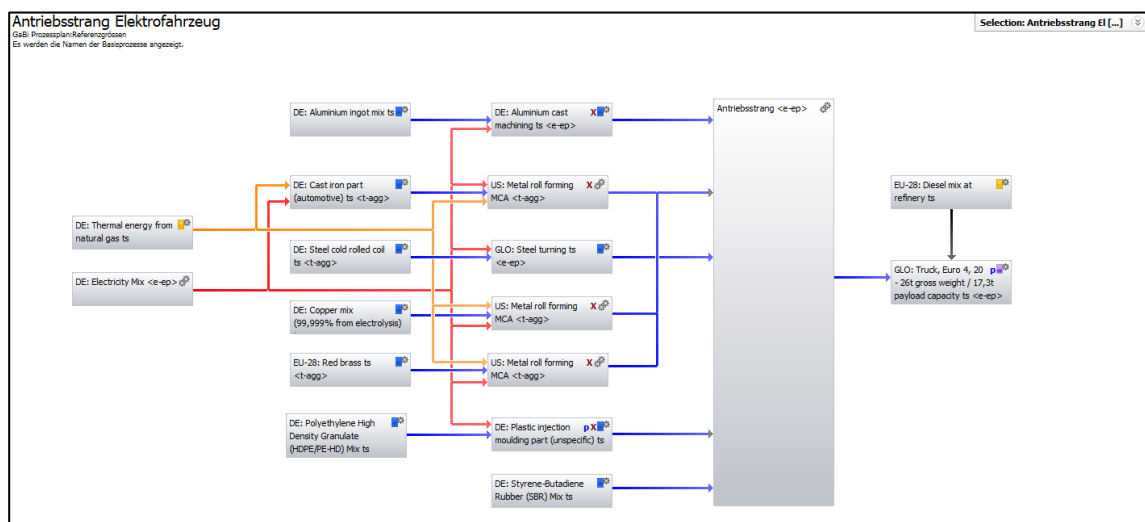


Abbildung 10: GaBi Systemaufbau Antriebsstrang Elektrofahrzeug

4.1.2.7 Bleibatterie

Bei der Blei-Batterie handelt es sich um eines der insgesamt drei Systeme die sowohl auf Elektrofahrzeug als auch auf Fahrzeug mit Verbrennungsmotor angewandt werden. Sie dient im Fahrzeug mit dem Verbrennungsmotor hauptsächlich dazu mit einem hohen Startstrom den Motor anzulassen. Außerdem werden Funktionseinheiten wie die Klimaanlage oder Radio mit Hilfe der Batterie betrieben. Für letztere Aufgaben ist die Blei-Batterie in dem Elektrofahrzeug auch gedacht. Die verwendeten Materialien sowie deren Gewichtsanteile können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 6: In Bleibatterie verbaute Materialien

Material	Materialanteil	Gewicht
Blei	68,3 %	4,03 kg

Wasser	14 %	0,83 kg
Schwefelsäure	8 %	0,47 kg
Fiberglas	2 %	0,12 kg
Acrylnitril-Butadien-Styrol	5,9 %	0,35 kg
Kupfer	1 %	0,06 kg
Antimon	0,7 %	0,04 kg
Gummi	0,1 %	0,01 kg
Arsen	0,03 %	0,002 kg

Einen geringen Anteil der betrachteten Bleibatterie machen die Werkstoffe Kupfer und Gummi aus. Diese wurden mittels der bereits im Vorfeld verwendeten Prozesse „Copper mix“, „Metal roll forming“ und „Styrene-Butadiene Rubber (SBR)“ modelliert.

Der Hauptbestandteil einer Bleibatterie ist natürlich das Blei. Mit einem Gewicht von 4,03 kg macht es ca. 68 % der insgesamt ca. 6kg schweren Batterie aus. Das Blei wird in der Batterie in unterschiedlicher Art und Weise verbaut. Die negativen Masseplatten werden aus flüssigem Blei gegossen und anschließend mit der aus Blei bestehenden Massepaste bestrichen. Die Simulation des Herstellungsprozesses sowie der Rohstoffgewinnung von Blei geschehen mittels des Prozesses „Lead“. Die weitere Verarbeitung des Bleis wird mittels des Prozesses „Metal roll forming“ simuliert. Auch hier wurde wieder darauf geachtet, dass die verwendete thermische und elektrische Energie den standortabhängigen Gegebenheiten entspricht.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Blei-Batterie ist die Schwefelsäure. Sie dient innerhalb der Batteriezelle als Elektrolyt und somit zum Ladungstransport. Die im System verwendete Schwefelsäure wird in GaBi mittels des Prozesses „Sulphur acid mix (96 %)“ simuliert. Da die Schwefelsäure in den Batteriepacks allerdings verdünnt angewendet wird, muss zusätzlich noch das verwendete Wasser simuliert werden. Da es sich hierbei um destilliertes Wasser handelt, wird der entsprechende Prozess „Water (desalinated; deionised)“ verwendet. Bei beiden verwendeten Prozessen wird sowohl die Rohstoffgewinnung als auch die Produktherstellung berücksichtigt.

Des Weiteren besteht eine Bleibatterie zu einem geringen Anteil aus Fiberglas. Die Herstellung des in der Batterie verbauten Fiberglases wird in diesem Fall mit dem Modul „Fiberglass batt NAIMA“ simuliert. Dieses beschreibt die Herstellung von Fiberglas nach den Normen der North American Insulation Manufacturers Association (NAIMA).

Ein weiterer in der Bleibatterie verbauter Bestandteil ist das Acrylnitril-Butadien-Styrol. Hierbei handelt es sich um einen Kunststoff. Da die verwendete Datenbank keine Herstellungsprozesse für den genannten Kunststoff beinhaltet, ist die Herstellung einfach mittels der bekannten Module „Polyethylene High Density Granulate“ und „Plastic injection moulding part (unspecific)“ simuliert worden. Die für den Prozess benötigte elektrische Energie entspringt dem Prozess „CH: Electricity mix“, da die untersuchte Bleibatterie aus China stammt und dessen Strommix damit simuliert wird.

Der Transport der fertigen Bleibatterie erfolgt über ca. 390 km per Lastkraftwagen und über ca. 18.000 km auf dem Seeweg. Die angegebenen Transportstrecken zwischen dem Herstellungsort der Batterie in Shenzhen und dem Smart-Werk in Hambach wurden mittels des Tools SeaRates LP ermittelt. Zur Simulation des Transportprozesses wurden die bekannten

Prozesse „GLO: Truck, EURO 4, 20 – 26t gross weight/ 17,3t payload capacity“, „EU-28: Diesel mix at refinery“, „GLO: Bulk commodity carrier, average, ocean going“ und „Heavy fuel oil at refinery“ herangezogen.

Die Herstellung der Materialien Arsen und Antimon konnte mit der verwendeten Datenbank nicht simuliert werden. Insgesamt machen sie allerdings nur 0,73 % des Gesamtgewichtes der betrachteten Batterie aus. Der Aufbau des in GaBi simulierten Systems „Bleibatterie“ kann der nachstehenden Abbildung entnommen werden.

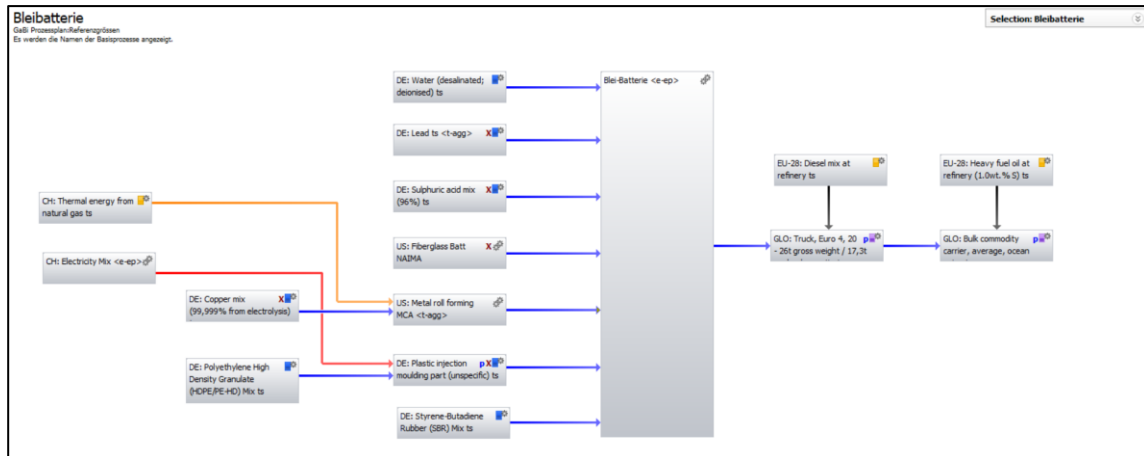


Abbildung 11: GaBi Systemaufbau Bleibatterie

4.1.2.8 Getriebe

Das Getriebe des Elektro-Smarts ist die zweite Komponente, die für beide SMART-Varianten angewandt wird. Es besteht lediglich aus den Metallen Aluminium und Stahl. Insgesamt wiegt das Getriebe des Smarts 25 kg. Damit macht Aluminium mit ca. 17,3 kg einen Anteil von 69 % des Gesamtgewichtes aus. Das verwendete Aluminium macht dementsprechend die restlichen 30,1 % aus, was ein Gesamtgewicht von ca. 7,7 kg ausmacht. Insgesamt ist der Aufbau des Systems „Getriebe“ also einfach.

Zur Simulation des Herstellungsprozesses der beiden Metalle werden die bekannten Prozesse „Aluminium ingot mix“, „Aluminium cast machining“ und „Steel cold rolled coil“ verwendet. So werden jeweils sowohl Rohstoffgewinnung als auch Herstellung in der Betrachtung mitberücksichtigt. Da das Getriebe von der Firma GETRAG mit Sitz in Deutschland hergestellt wird, entspringt der im Prozess verwendete Strom dem deutschen Strommix. Dieser wird simuliert durch das Modul „DE: Electricity mix“. Der hierbei verwendete Emissionswert für CO₂-Äquivalenz bei dem Bezug einer kWh elektrischer Energie aus dem deutschen Strommix wurde [9] entnommen und beträgt 0,706 kg CO₂-Äquivalenz/ kWh_{el}.

Das Getriebe wird in Neuhausen bei Karlsruhe angefertigt. Die daraus resultierende Transportstrecke von ca. 250 km wurde mittels der Prozesse „GLO: Truck, EURO 4, 20 – 26t gross weight/ 17,3t payload capacity“ und „EU-28: Diesel mix at refinery“ simuliert. Der Aufbau des Systems kann der Abbildung 12 entnommen werden.

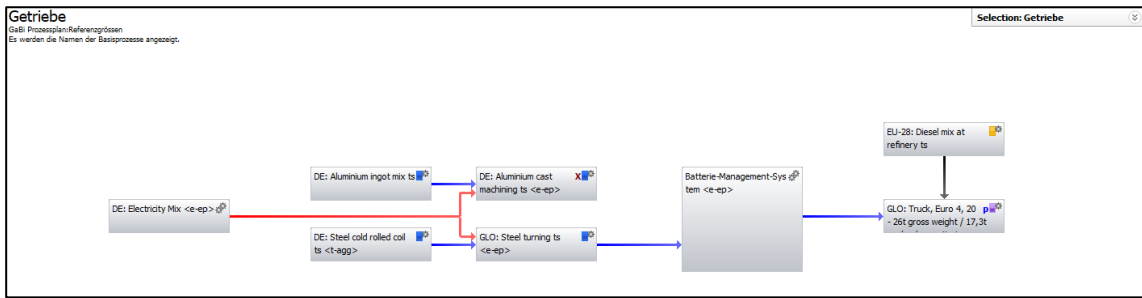


Abbildung 12: GaBi Systemaufbau Getriebe

4.1.2.9 Karosserie und Fahrgestell

Die Karosserie im Zusammenschluss mit dem Fahrgestell bilden die dritte Fahrzeugkomponente, die sowohl auf den Elektro-Smart als auch auf den SMART mit Verbrennungsmotor angewandt werden können. Insgesamt wiegen Karosserie und Fahrgestell ca. 705 kg, von denen Metalle wie Aluminium, Stahl oder Eisen die größten Anteile ausmachen. Die genaue Aufschlüsselung kann dem Anhang entnommen werden.

Die unterschiedlichen Arten des Stahles, welche unter der Materialgruppe „Eisenwerkstoffe“ zusammengefasst sind, werden alle mit dem Prozess „Steel cold rolled coil“ sowie „Steel sheet stamping and bending“ simuliert. Ähnliches gilt für die unter der Materialgruppe „Aluminium“ zusammengefassten Aluminiumbestandteilen. Diese wurden Mittels der Prozesse „Aluminium sheet“ und „Aluminium sheet deep drawing“ dargestellt.

In der Materialgruppe der „Nichteisenmetalle“ wurden die einzelnen Materialien Separat voneinander dargestellt. Zur Simulation der Werkstoffe Kupfer und Blei wurden die bekannten Prozesse „Copper mix“ und „Lead“ herangezogen. Zur Simulation des verbauten Magnesiums wurde der Prozess „Magnesium“ verwendet. Dieser berücksichtigt die Herstellung des Magnesiums im Pidgeon Prozess sowie die vorherige Förderung der notwendigen Rohstoffe. Zur Simulation des verwendeten Zinks wird der entsprechende Prozess „Zinc redistilled mix“ herangezogen. Dieser beschreibt die Herstellung von Zink mittels einer Elektrolyse und späterem einschmelzen sowie die vorherigen Schritte in der Produktionskette wie z.B. den Abbau der Rohstoffe. Die Bearbeitung der Metalle wurde jeweils durch den Prozess „Metal roll forming“ simuliert. Die dafür benötigte thermische und elektrische Energie entspringt den Prozessen „FR: Electricity Mix“ und „FR: Thermal energy from natural gas“ durch die die jeweilige Zusammensetzung der Energieformen in Frankreich simuliert wird. Der Referenzwert für die Emissionen von CO₂-Äquivalenz bei dem Bezug einer kWh elektrischer Energie in Frankreich wurde [9] entnommen und beträgt 0,146 kg CO₂-Äquivalenz/ kWh_{el}. Der im europäischen Durchschnitt sehr geringe Wert resultiert aus dem hohen Anteil elektrischer Energie, die durch Atomkraftwerke gewonnen wird. Die unter dem Material „Andere Metalle“ zusammengefasste Produktbestandteile wurde in dieser Betrachtung aufgrund der lückenhaften Daten nicht simuliert.

Auch die einzelnen Werkstoffe der Materialgruppe Kunststoffe wurden einzeln in GaBi simuliert. Für das verwendete Polypropylen und die anschließende Teileherstellung wurden die Prozesse „Polypropylen High Density Granulate“ sowie „Plastic injection moulding part (unspecific“ verwendet. Auch das verbaute Polyamid hat in der Simulation Berücksichtigung gefunden. Hierfür wurde das Modul „Polyamide 6.6 fibres“ verwendet. Es beschreibt die

Herstellung des Polyamides sowie dessen Verarbeitung zu Fasern und die vorherige Rohstoffgewinnung. Auch das verwendete Polyurethan wurde mit Hilfe des Prozesses „Polyurethane rigid foam (PU)“ simuliert. Dieser beinhaltet ebenfalls alle Prozessschritte der Herstellung sowie der Rohstoffgewinnung. Abschließend wurden die Materialien Polyethylenterephthalat, Acrylnitril-Butadien-Styrol, Polyethylen und alle anderen verwendeten Kunststoffe in den Prozessen „Polyethylene High Density Granulate“ sowie „Plastic injection moulding part (unspecific)“ zusammengefasst. So werden die Kunststoffe, für die keine Prozesse in der Datenbank vorhanden sind, ebenfalls berücksichtigt.

Die nächsten betrachteten Materialien sind unter der Materialgruppe „Synthetik zusammengefasst“. Zur Simulation des verwendeten Fibreglasses wurde das Modul „Glass fibres“ herangezogen. Auch hier werden wieder sowohl die Rohstoffgewinnung als auch der Herstellungsprozess berücksichtigt. Das gleiche gilt für das verbaute Glas und den dafür verwendeten Prozess „Float flat glass“. Die Herstellung der verwendeten Harze und Textilien konnten aufgrund von fehlenden Prozessen in der verwendeten Datenbank nicht simuliert werden.

Abschließend wurde die Materialgruppe „Sonstige Materialien“ in das System integriert. Hier sind die Materialien Gummi und Öle bzw. Schmierstoffe mit Hilfe der bereits im Vorfeld verwendeten Prozesse „Styrene-Butadiene Rubber (SBR)“ und „Light fuel oil at refinery“ simuliert worden. Auf die Simulation der verwendeten Lacke und Isoliermaterialien wurde mangels verlässlicher Datengrundlage verzichtet. Die verwendete Leiterplatte wurde im Prozess zur Simulation von Polyethylen mitberücksichtigt.

Für Fahrgestell und Karosserie wurde nach [5] eine Standard-Transportdistanz von 100 km angenommen. Der Transport wurde mit Hilfe der bekannten Prozesse zur Simulation eines Lastkraftwagens sowie dem dazugehörigen Dieserverbrauch dargestellt. Der endgültige Aufbau des Systems „Karosserie und Fahrgestell“ kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.

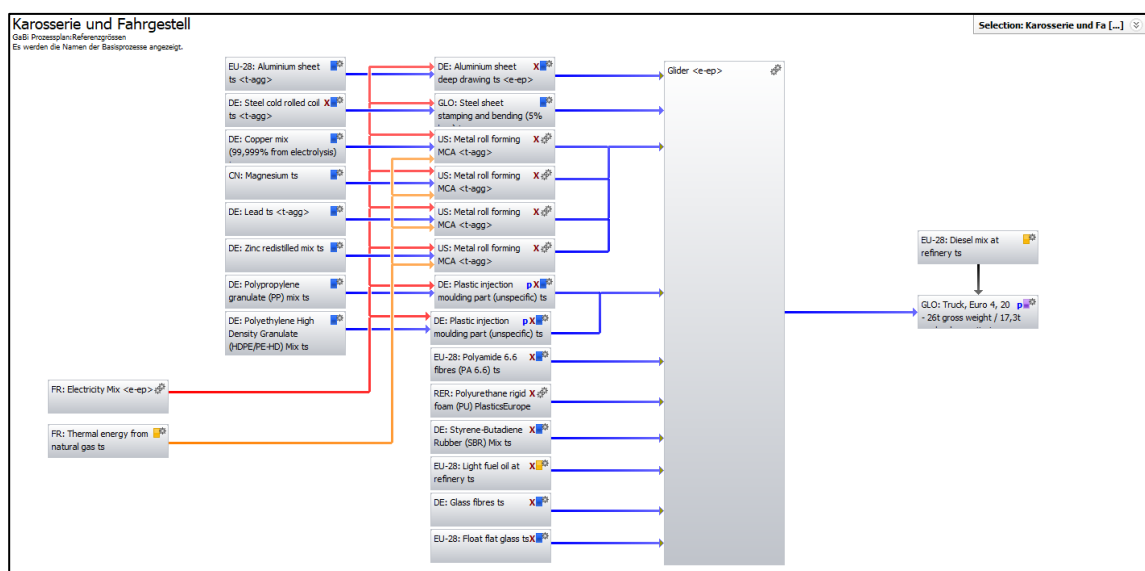


Abbildung 13: GaBi Systemaufbau Karosserie und Fahrgestell

4.1.3 SMART mit Verbrennungsmotor

Für einen adäquaten Vergleich zwischen Elektrofahrzeug und Verbrenner bietet es sich an den gleichen Smart als Variante mit Verbrennungsmotor für die Untersuchung heranzuziehen. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass sich nur ausgewählte Komponenten von der Version als Elektro-Smart unterscheiden.

Der Benzin-Smart zeichnet sich in erster Linie durch seinen Verbrennungsmotor aus. Bezogen auf das Gesamtgewicht macht der Motor bei einem Verbrenner einen viel größeren Anteil aus als der Elektromotor bei dem Elektrofahrzeug. Eine weitere separat zu betrachtender Komponente bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor ist der Antriebsstrang. Der Unterschied zwischen den Antriebssträngen der beiden Fahrzeugvarianten ist so groß, dass sie für jede Fahrzeugvariante einzeln simuliert werden müssen. Die im Vorfeld angefertigten Systeme „Getriebe“, „Bleibatterie“ sowie „Karosserie und Fahrgestell“ können auf den Benzin-Smart genauso angewandt werden wie auf den Elektro-SMART. Die Komponenten unterscheiden sich zwischen den beiden Varianten kaum.

Die Auswahl des Smarts mit Verbrennungsmotor als Vergleichsobjekt bietet den Vorteil, dass die entworfenen Systeme „Bleibatterie“, Getriebe sowie „Fahrwerk und Karosserie“ auf beide Fahrzeugvarianten angewandt werden können. Ausführung und Zusammensetzung dieser Teilkomponenten unterscheiden sich in den beiden Fahrzeugvarianten kaum voneinander. Im Anschluss werden die charakteristischen Systemkomponenten eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor erneut mit Hilfe von GaBi simuliert.

4.1.3.1 Benzinmotor

Der Benzinmotor macht bei der entsprechenden Smart-Variante den größten Gewichtsanteil aus. Mit insgesamt ca. 59 kg handelt es sich aber trotzdem um einen vergleichbar kleinen Motor. Die Materialzusammensetzung des Benzinmotors kann Tabelle 7 entnommen werden.

Tabelle 7: In Benzinmotor verbaute Materialien

Material	Materialanteil	Gewicht
Gusseisen	35 %	20,65 kg
Aluminium	30 %	17,7 kg
Stahl	28 %	16,52 kg
Kupfer	5 %	2,95 kg
Polypropylen	2 %	1,18 kg

Es fällt auf, dass der Motor zu 93 % aus den Metallen Gusseisen, Aluminium und Stahl besteht. Die Materialien Kupfer und Polypropylen machen lediglich einen sehr geringen Anteil aus.

In Diesem System kommen ausschließlich Prozesse zum Einsatz, die im Vorfeld bereits ausführlich erläutert wurden. Zur Simulation des verarbeiteten Aluminiums werden die Prozesse „Aluminium ingot mix“ und „Aluminium cast machining“ herangezogen. Die verwendeten Gusseisen-, Stahl- und Kupferbestandteile werden mittels der Prozesse „Cast iron past (automotiv)“, „steel cast part alloyed“ und „Copper mix“ simuliert. Um deren Verarbeitung zu simulieren werden die Prozesse „steel turning“ und „Metal roll forming“ herangezogen. Auch

für die Modellierung der Plastikkomponenten werden bereits bekannte Prozesse verwendet. Hierzu werden die Prozesse „Polyethylene High Density Granulate“ und „Plastic injection moulding part (unspecific)“ verwendet. Der betrachtete Motor wird in Japan hergestellt, weshalb die Prozessenergie mittels des Prozesses „JP: Electricity mix“ simuliert wird. So wird der japanische Strommix mit einer Emission von CO₂-Äquivalenten von 0,443 kg CO₂-Äquivalent/ kWh_{el} dargestellt [10].

Für den Transport von Shiga in Japan nach Hambach wurde durch SeaRates LP eine Transportstrecke von insgesamt ca. 20.800 km ermittelt. Diese setzt sich zusammen aus ca. 450 km Transport über die Straße und 20.360 km über den Seeweg. Simuliert wurde der Transport mit Hilfe der Module zur Modellierung eines Lastkraftwagens und eines Containerschiffes. Der dazugehörige Verbrauch von Diesel und Schweröl wurde ebenfalls durch die entsprechenden Prozesse simuliert. Der endgültige Aufbau des Systems kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.

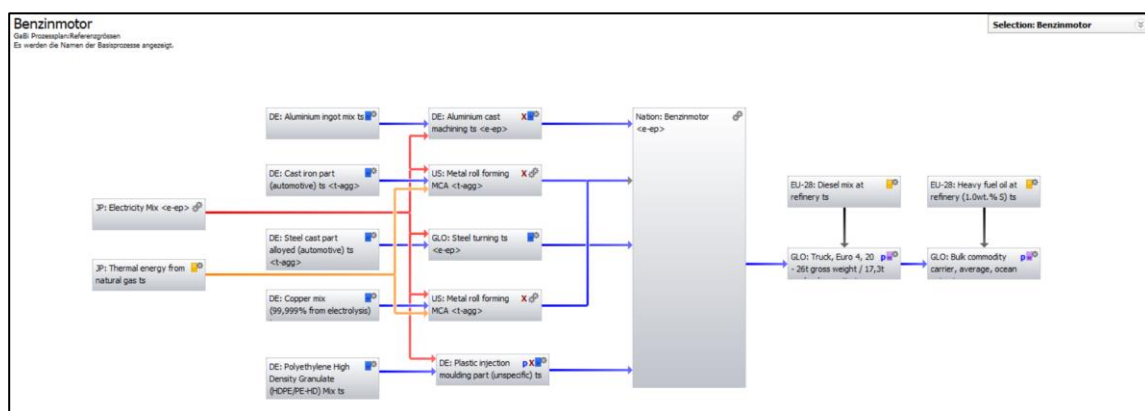


Abbildung 14: GaBi Systemaufbau Benzinmotor

4.1.3.2 Antriebsstrang Benzin-SMART

Abschließend bleibt nur noch das System „Antriebsstrang Benzin-SMART“ zu simulieren. Die Hauptbestandteile des untersuchten Antriebsstranges sind Metalle, Kunststoffe und Schmieröl. Der genaue Aufbau des Systems kann der nachstehenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 8: Antriebsstrang Benzin-SMART verbaute Materialien

Material	Materialanteil	Gewicht
Aluminium	12,1 %	2,34
Kupfer	7,1 %	1,37
Schmieröl	15 %	2,9
Polypropylen	15,1 %	2,91
Polyethylen	9,4 %	1,81
Polyamide	6 %	1,16
Gummi	2,3 %	0,44
Stahl	13,8 %	2,66
Gusseisen	19,2 %	3,71

Für die Simulation der einzeln verbauten metallischen Bestandteile wurden die bekannten Prozesse zur Modellierung von Aluminium, Gusseisen, Stahl und Kupfer verwendet. Auch die Bestandteile aus Kunststoff konnten einzeln simuliert werden. Hierunter fallen die Teile aus Polyethylen, Polypropylen, Polyamid und Gummi. Zur Simulation des verwendeten Schmieröls wurde der Prozess „EU-28: Light fuel oil at refinery“ verwendet. Da die genaue Herkunft des verwendeten Schmieröls nicht bekannt ist, berücksichtigt der Prozess die durchschnittlichen Energie- und Prozessströme bei der Herstellung von Leichtöl in der gesamten Europäischen Union.

Da der genaue Herstellungsort der einzelbestandteile des Antriebsstranges nicht ermittelt werden konnte, wird nach [5] eine durchschnittliche Transportdistanz von 100 km angenommen. Der Transport wurde erneut mit Hilfe der Prozesse zur Simulation von Lastkraftwagen und Dieselverbrauch modelliert. Der Aufbau der fertigen Systems kann der nachstehenden Abbildung entnommen werden.

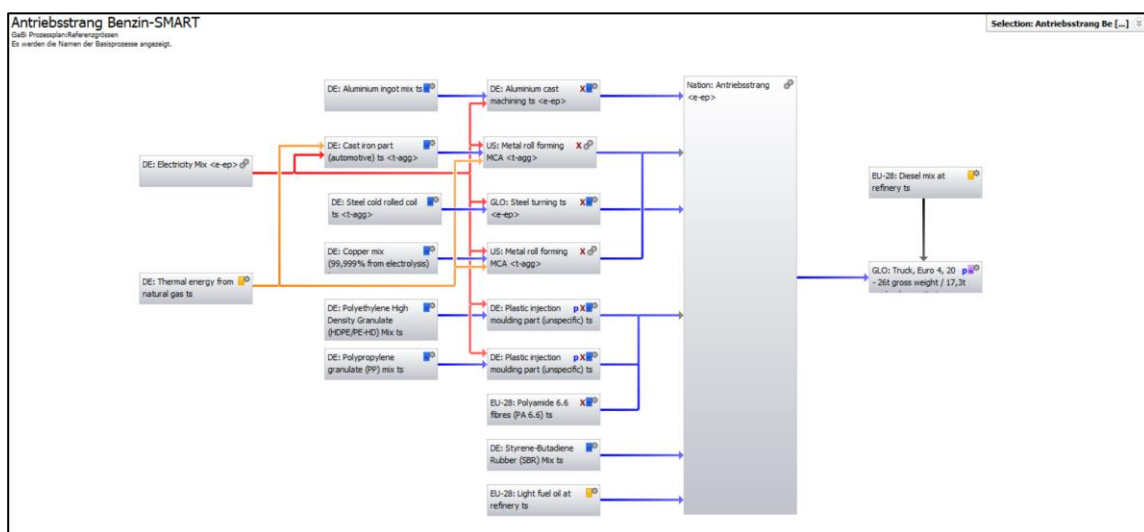


Abbildung 15: GaBi Systemaufbau Antriebsstrang Benzin-SMART

4.2 Nutzung

Die Umweltbeiträge in der Nutzungsphase des Fahrzeuges können das Treibhauspotential maßgeblich beeinflussen. Der Klimaeffekt wird dabei im Wesentlichen durch den Energieverbrauch des Fahrzeugs und der Effizienz der Strombereitstellung bestimmt. Bei der Nutzungsphase bezieht sich die Klimaauswirkung analog zu anderen Bereichen auf das Treibhauspotential. Die Einheit ist dementsprechend kg CO₂-Äquivalenz. Die Berechnung der Umweltwirkung basiert hauptsächlich auf der Datenbank GEMIS, sowie SMARD-Daten der Energieerzeugung. Ergänzt werden die fehlenden Informationen durch möglichst verlässliche Quellen. Hierbei wurden die meisten Daten von offiziellen Einrichtungen wie dem statistischen Bundesamt herangezogen. So konnte gewährleistet werden, dass keine Daten von befangenen Interessensgruppen verwendet wurden. Die Simulation wurde anschließend bei Excel durchgeführt um möglichst freien Zugang für Dritte zu gewährleisten sowie die Betrachtung des aufgeschlüsselten Strommix in das Modell zu integrieren.

4.2.1 Aufstellen der Sachbilanz im Betrieb

Um in Abhängigkeit energiewirtschaftlicher Parameter den jeweiligen „Ladestrommix“ modellieren zu können, wird die zeitlich aufgelöste Stromnachfrage durch Elektrofahrzeuge benötigt, die aus unterschiedlichen Annahmen zu den zurückgelegten Distanzen, spezifischen Stromverbräuchen sowie der zeitlichen Struktur der Beladung zusammen gesetzt ist.

4.2.2 Getroffene Annahmen und Bilanzierungsgrenzen

Um eine möglichst objektive Aussage über die Klimaschädlichkeit des Elektro-Smartes treffen zu können, werden die Vorketten der Stromerzeuger während der Ladezeiten berücksichtigt. Analog dazu werden die indirekten Emissionen beim Benzin bilanziert. Aus den Angaben zu den durchschnittlichen gefahrenen Distanzen des Fahrzeugmodells und dem angenommenen Mobilitätsprofil des Fahrzeugnutzers (siehe Kapitel Mobilitätsverhalten) ergibt sich die Lebensdauer des Elektro-Smart von 9,12 Jahren [4]. Alle anderen Annahmen der Einzelprozesse sollten für beide Smartvarianten unverändert bleiben und in jeweiligen Kapiteln erläutert.

4.2.3 Mobilitätsverhalten

Für die Erstellung typischer Ladeprofile der Elektrofahrzeuge sowie Angaben zum Kraftstoffverbrauch des Benzin-Smart sind Daten zu dem Fahrverhalten des Verkehrs und die Wahrscheinlichkeit der Ankunftszeit der Automobile vorausgesetzt. Dazu werden die Mobilitätsprofile der Deutschen in diesem Kapitel ausgewertet und auf den spezifischen Fall angepasst.

4.2.3.1 Typisches Mobilitätsverhalten in Deutschland

Realistische Annahmen zu gängigen Mobilitätsmustern in Deutschland werden anhand empirisch gesammelter Daten getroffen. Dabei ist die "Mobilität in Deutschland" (MiD) mit insgesamt über 155.000 teilnehmenden Haushalten die weltweit größte Mobilitätsbefragung über die Alltagsmobilität der in Deutschland lebenden Menschen. Die für den Betrieb des Elektro-Smarts interessanten Daten sind dabei die werktäglich zurückgelegten Wegstrecken, Anzahl der Strecken pro Tag, die Verteilungen der Arbeitsbeginn- und Arbeitsendzeiten sowie auf das Standverhalten der einzelnen Fahrzeuge. Daraus können durchschnittliche tägliche Fahrleistungen bzw. Fahrstrecken zwischen Ladevorgängen berechnet werden. Die Auswertung der MiD-Daten bestätigt, dass wenn Automobile bewegt werden ca.80 % der Fahrzeuge im Alltag weniger als 50 Kilometer an einem Tag zurücklegen und ein Deutscher im Schnitt täglich 39 km mit dem Auto zurücklegt. Am Werktag bleiben im Durchschnitt 37 % der Autos in der Garage oder auf dem Parkplatz, am Samstag 44 % und am Sonntag 63 %. Am Sonntag wird besonders wenig Auto gefahren. Knapp über 60 % der Fahrzeuge werden gar nicht genutzt. [11]

4.2.3.2 Einschränkungen und Annahmen bei Kleinstwagen

Um ein typisches Mobilitätsprofil eines Elektroautobesitzers aus den empirischen Daten zu erstellen, wurden die MiD Daten in Bezug auf die Eigenschaften eines E-Mobilbesitzers ausgewertet. Laut Daten des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik (DLR) werden

Elektrofahrzeuge von Privatanutzern für die allermeisten täglichen Wegezwecke genutzt. Insgesamt legen 63 % der Nutzer mit dem Elektrofahrzeug täglich den Arbeits-/ Ausbildungsweg zurück. Der MiD-Schnitt fährt im durchschnittlich 39 km werktags sowie samstags und am Sonntag mit 50 % Wahrscheinlichkeit die tägliche Strecke. Interessant für die Betrachtung ist ebenso das Profil des Elektroautobesitzers. Der Early Adopter von Elektrofahrzeugen in Deutschland ist überwiegend männlich, mittleren Alters, mit einem vergleichsweise hohen Bildungsabschluss sowie einem hohen Einkommen. Die Urlaubsfahrten und Wochenendausflüge können deswegen meist mit einem anderen Pkw des Haushalts durchgeführt werden und werden in der Betrachtung daher nicht mitberücksichtigt. Dies ist bei der hier analysierten Nutzergruppe der Early Adopter angesichts der hohen PKW-Ausstattung der Haushalte unproblematisch. [12]

4.2.4 Sachbilanz E-Smart

4.2.4.1 Fahrzeugspezifische Daten

Beim Elektroauto ist der direkte Emissionsfaktor laut ADAC Angaben gleich null[13]. Doch die Elektroautos verlagern einen Teil der klimaschädlichen Emissionen, die sonst im Verkehrssektor anfallen würden in den Stromsektor, weshalb der spezifische Stromverbrauch des jeweiligen Fahrzeuges in diesem Kapitel betrachtet wird.

Spezifischer Stromverbrauch

Der vom Hersteller angegebene Stromverbrauch für den E-Smart ist 13,5 kWh/ 100 km, jedoch weist eine Vielzahl von Testfahrten auf einen deutlich höheren Verbrauch des Elektro-Smart hin [3, 14]. Ursache ist einerseits die geringere Effizienz von Lithium-Akkus bei kälteren Temperaturen und andererseits die akkubetriebene Heizung des Innenraums. Der Smart schaffte bei empirischen Messungen bei 23°C Außentemperatur eine Fahrt von 159 km, bei -7°C im selben Test lediglich 84 km, wobei die maximale Reichweite laut Hersteller 120 km beträgt. Energie- und Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge kann jedoch zur Referenzzwecken in Abhängigkeit des Fahrzeuggewichts und anderer Fahrzeugparameter mit einem physikbasierten Verbrauchsmodell des Instituts für Energie- und Umweltforschung nachgebaut werden. Die Grundlage bildet der Energiebedarf am Rad, der mittels der Fahrzeugparameter und Geschwindigkeitsprofile modelliert werden kann [15]. Die Modellierung ermöglicht die Berücksichtigung eines MID – berechneten Fahrprofils von 30 % auf Innerorts, 40 % auf Außerortsstraßen und 30 % auf Autobahnen sowie den Energieverbrauch der Nebenaggregate. Unter Verwendung realer Energieverbräuche (Kraftstoffe bzw. Strom) wie sie in Alltagstests ermittelt werden, wird beim Elektroauto sogar mit einem darüberhinausgehenden Zuschlag von 15 % gerechnet, da auch Alltagstest manchmal nicht alle Temperaturbereiche abdecken. So können unter Berücksichtigung der Heizung sowie Beleuchtung bei gemischtem Verkehr ein erhöhter Verbrauch von rund 20 kWh/ 100 km festgestellt werden. Mit diesem eher erhöhtem Wert kann eine realistische und konservative Berechnung der Klimawirkung des Smart durchgeführt werden. [3]

Spezifische Ladeeigenschaften

Das Laden des Elektrofahrzeugs kann erhebliche Auswirkungen auf die Ökobilanz haben. Der Elektro-Smart hat eine Ladekapazität von max. 3,7 kW. An einer normalen Steckdose

mit einer Phase und 16 A Sicherung bei 230 V ist diese Ladeleistung möglich. Es wird unter Einrechnung der Verluste zwischen Kraftwerk, Steckdose und Fahrzeugbatterie simuliert. [1]

4.2.4.2 Simulation des Ladeverhaltens

In diesem Kapitel soll die Beschreibung des Algorithmus zur Generierung einzelner Lastprofile für den Elektro-Smart erfolgen.

Ladeprofil

Der Ladeort in unmittelbarer Nähe zur Wohnung stellt eindeutig die an der häufigsten genutzte Möglichkeit zum Laden dar. Laut einer Studie vom DLR geben 96 % der Befragten an, dass privat im Haushalt laden. Die Personen, die in unmittelbarer Nähe zur Wohnung laden, tun dies überwiegend täglich. [12]

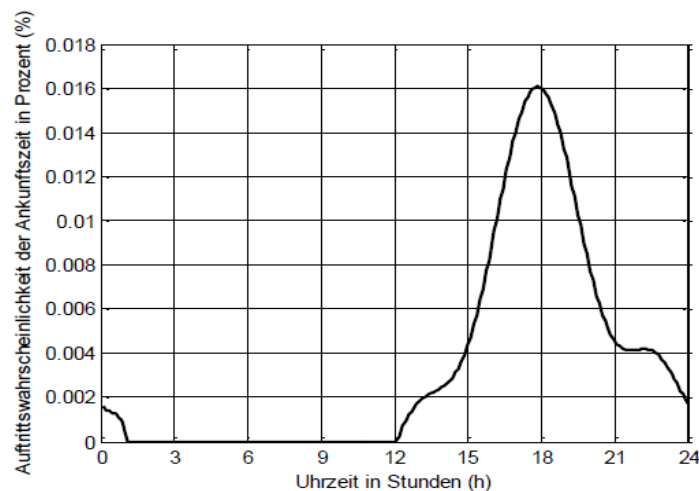


Abbildung 16: Wahrscheinlichkeitsdichte der Ankunftszeit

Mit der Auswertung der Standzeiten des Fahrzeuges kann eine Varietät der möglichen Lade-strategien entwickelt werden. Oft jedoch suggeriert die Ankunftszeit eines Fahrzeugs nach der letzten Fahrt am Tag die Annahme des wahrscheinlichen Ladebeginns. Bei einer beliebigen Direktladung bei der Ankunft von der Arbeit kann im Schnitt mit gehäuften Ladebeginn zwischen 17:30 und 18:30 simuliert werden. [15, 16]

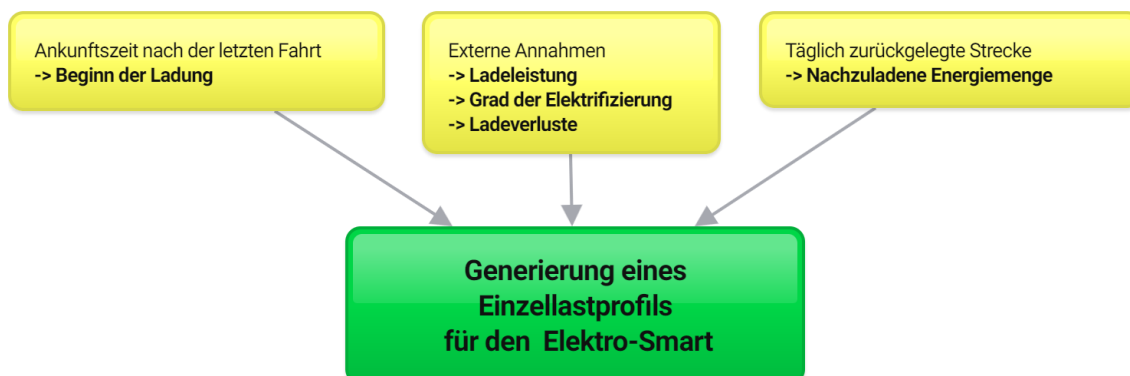


Abbildung 17: Generierung des Ladeprofiles, eigene Darstellung

Während der Ladezeit wird von einer Ladung mit maximalen Ladeleistung ausgegangen, bis der Akku zu 100 % gefüllt ist. Anhand des Datums kann zwischen Werk- und Wochenendtag unterschieden werden und das Mobilitätsverhalten der MiD-Studie mit dazugehörigen Ankunftszeiten integriert werden. Die Wochenendausflüge sowie längere Fahrten bleiben unberücksichtigt, da es sich bei einem Smart um ein Kleinstfahrzeug handelt. Die vereinfachten Annahmen der Zufälligkeit, dass betrachtete Fahrzeug am Tag überhaupt fährt und eine durchschnittliche Ankunftszeit des Fahrzeuges müssen zunächst in dem Modell toleriert werden (siehe Abbildung 16: Wahrscheinlichkeitsdichte der Ankunftszeit). [16, 17]

Einschränkungen beim Laden

Nutzungs einschränkungen ergeben sich für die privaten Nutzer insbesondere bei Urlaubsfahrten. Dabei stellt die elektrische Reichweite das größte Nutzungshindernis dar. Insgesamt 51 % der Elektrofahrzeugnutzer geben laut DLR an, dass sie das Elektrofahrzeug für Kurzurlaube und Wochenendausflüge nutzen wollen, dies aber nicht können. Auch Verwandte und Bekannte können von 27 % der Befragten nicht mit dem Elektrofahrzeug besucht werden. Um die genannten Fahrten dennoch durchzuführen, greifen die Befragten größtenteils auf einen anderen PKW des Haushalts zurück. Teilweise weichen sie auch auf Bahnfahrten oder Flüge aus. Alltägliche, in der Regel kürzere Wege stellen kaum ein Problem dar. [12, 17]

4.2.4.3 Stromursprung

Der Emissionsfaktor der Elektrizitätserzeugung hängt maßgeblich vom Kraftwerkstyp ab. Entscheidend für die Klima- und Umweltverträglichkeit der Elektroautos ist dementsprechend, in welchen Kraftwerken und aus welchen Energieträgern die verwendete Elektrizität gewonnen wird. Zur Berechnung der Emissionen kann also verglichen werden wie der Kraftwerkseinsatz mit und ohne Elektrofahrzeuge aussieht. Nach den Regeln des Strommarkts kommt für jede zusätzlich nachgefragte Kilowattstunde Strom auf den Markt, der zu den jeweils nächst günstigsten Kosten produziert wird. [18]

Simulationszeitraum Stromerzeugung

Um möglichst exakte Werte für die Simulation zu erhalten, wurden die Einspeiseprofile von erneuerbaren und konventionellen Kraftwerken in 15-minütiger Auflösung für das Jahr 2017 ausgewertet. Als Grundlage wurden aufgrund von der höchstmöglichen Auflösung die Strommarktdaten von SMARD der Bundesnetzagentur benutzt [18]. Anhand der Abbildung 18 erkennt man die fluktuierende Produktion Erneuerbarer Energien im Vergleich zur Gesamtstromerzeugung. Die Einspeisung wurde nach 12 unterschiedlichen Stromerzeugungsanlagen sortiert und mit den jeweiligen Vorketten deren Klimawirkung ausgewertet.

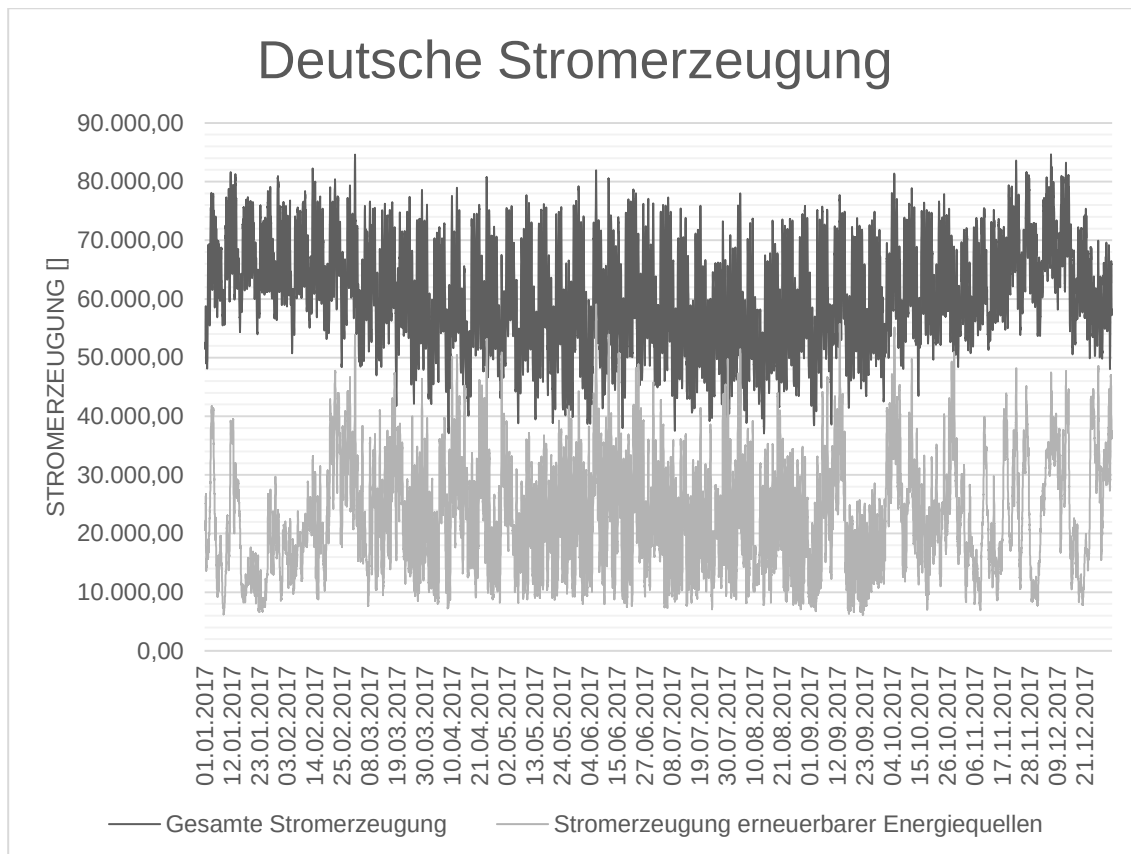


Abbildung 18: Deutsche Stromerzeugung im Referenzjahr 2017

Vorkette einzelner Energieerzeuger

Die Erzeugung von Strom benötigt bedeutende Mengen an Vorprodukten und sonstigen Inputs, wie z.B. Energie oder Wasser. Weil die Vorprodukte und Vorvorprodukte usw. auch stets Inputs aus dem System beziehen, entsteht eine Netzstruktur, die mit komplexerem Aufbau aufweist. Alle vorgelagerten Prozesse sind im Emissionsfaktor berücksichtigt. Der Mix der Energieträger bestimmt darüber, wie sauber der erzeugte Strom ist – bei Kohle und Erdgas gehören dazu im Wesentlichen die Emissionen bei der Produktion im Kraftwerk. Diese Mengen variieren stark. Bei der Erzeugung einer Kilowattstunde Strom aus Kohle wird beispielsweise mehr als doppelt so viel Kohlenstoffdioxid freigesetzt wie bei einer Kilowattstunde aus Erneuerbare Energien emittieren [1, 19]. Die Ermittlung der Emissionsfaktoren der Vorkette konnte in einzelnen Modulen bei GaBi auf der Basis der Datenbank GEMIS erfolgen [20]. Die Ergebnisse wurden dabei die die Simulation einzeln bei Excel hinzugefügt und im Simulationszeitraum ausgewertet.

Tabelle 9:gesamte Emissionsfaktoren der deutschen Stromerzeugung [19, 21]

Stromursprung	CO ₂ -Faktor	Einheit
Braunkohle	1,041	kg/kWh
Steinkohle	0,936	kg/kWh
Gas	0,432	kg/kWh
Öl	0,871	kg/kWh
Kernenergie	0,055	kg/kWh
Photovoltaik	0,056	kg/kWh

Wind (onshore)	0,009	kg/kWh
Wind (offshore)	0,004	kg/kWh
Wasser	0,003	kg/kWh
Geothermie	0,218	kg/kWh
Feste Biomasse	0,024	kg/kWh
Biogas	0,457	kg/kWh
Flüssige Biomasse	0,348	kg/kWh
Klärgas	0,031	kg/kWh
Deponiegas	0,03	kg/kWh
Biogener Anteil Abfall	0,005	kg/kWh

Bei nachhaltiger Erzeugung ist erneuerbar erzeugter Strom beispielsweise vergleichsweise klimafreundlich. Wenn man die Datenbank in Bezug auf einzelne Energieträger auswertet und die Vorkette der aktuellen Stromeinspeisung berücksichtigt, kann eine Simulation der „Klimafreundlichkeit des Stromes“ über das Jahr nachgebaut werden. Die Abbildung 19 stellt grafisch die Klimawirkung des Stroms über den Simulationszeitraum dar.

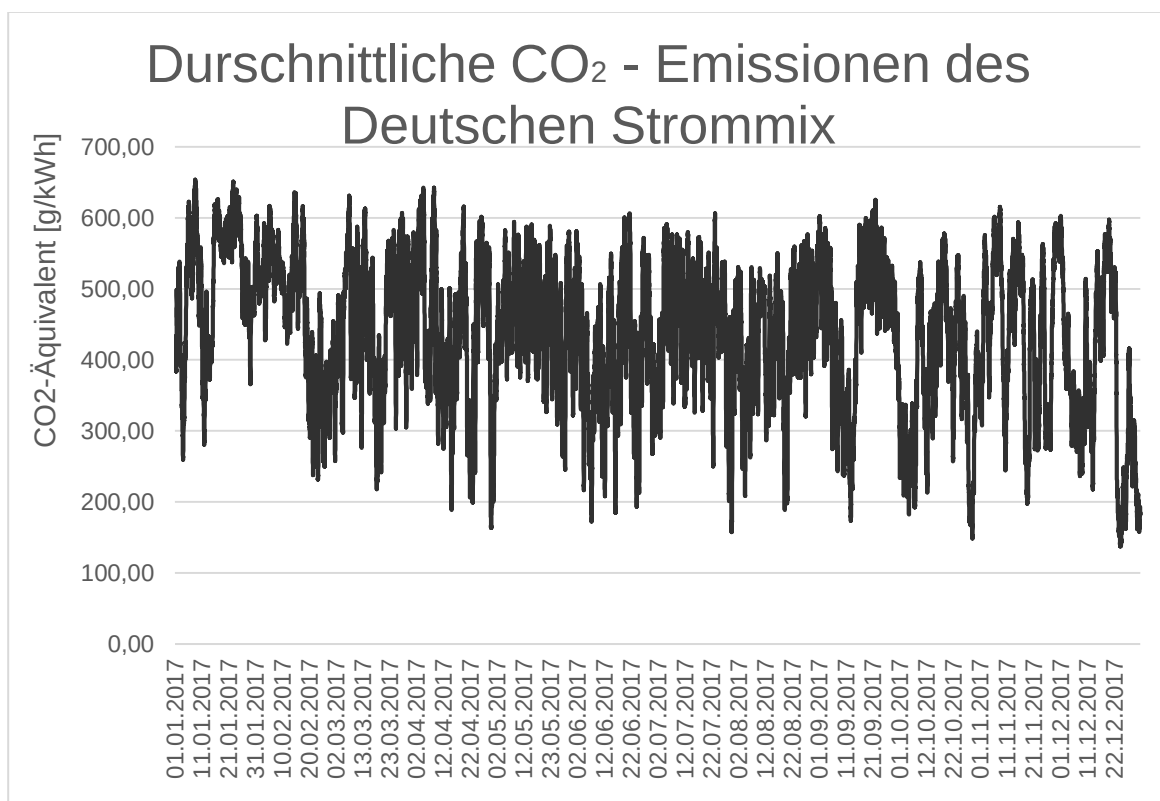


Abbildung 19: Durchschnittliche Emissionen des deutschen Strommix

Annahme zu dem künftigen Mix

Da die künftige Produktion des Stromes nicht exakt vorhergesagt werden kann, musste für die Emissionsbilanz ab dem Jahr 2018 bis 2027 ist eine Entwicklung der Stromproduktion prognostiziert werden. Analog zum Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

wurde ein wachsender Trend zum mäßigen Ausbau regenerativer Energien angenommen [21, 22]. Mit nahezu kontinuierlich sinkenden durchschnittlichen spezifischen Kohlenstoffdioxidproduktion im Deutschen Mix kann über die betrachtende Lebensdauer des Smartes der Klimaeffekt beim Laden in das Modell integriert werden (siehe Abbildung 20: Prognose THG-Emissionen im Stromsektor).

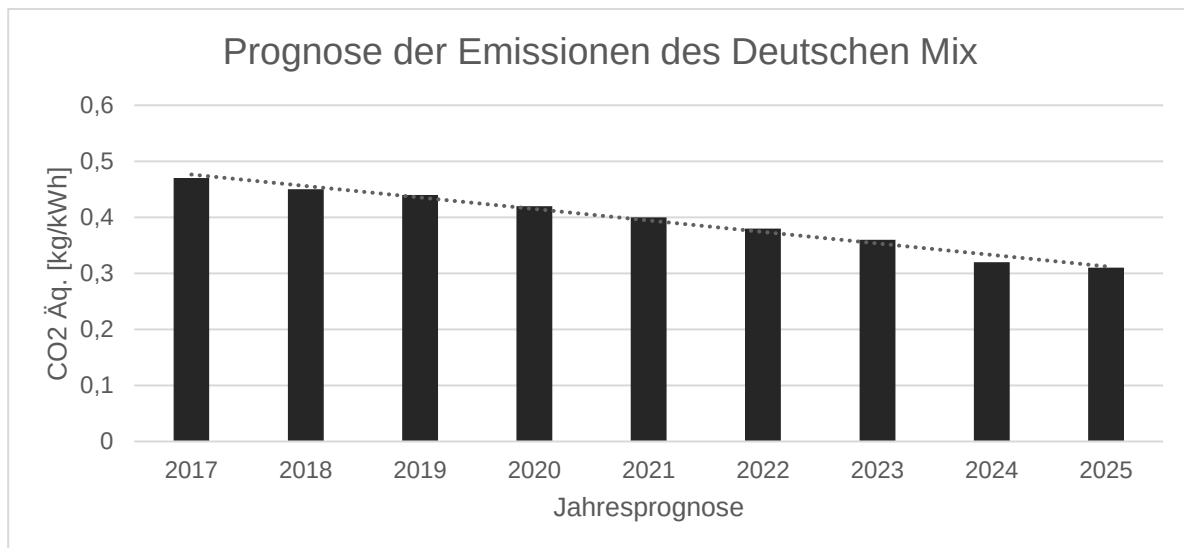


Abbildung 20: Prognose THG-Emissionen im Stromsektor

4.2.4.4 Ergebnisse der Emissionen während des Simulationszeitraum

Die Ergebnisse in punkto Umweltentlastung sind ernüchternd. Das Ergebnis des Modells, unter Berücksichtigung in diesem Kapitel erwähnten Annahmen wie Mobilität und Ladeverhalten, weist eine Belastung von 10,22 t CO₂-Äquivalenz über die Lebensdauer der Smarts auf. Dies bedeutet 0,072 kg CO₂-Äquivalenz Produktion pro km.

4.2.5 Sachbilanz Benzin-Smart

Zu Referenzzwecken soll in diesem Kapitel der mit Benzin betriebene Smart des Selben Modells unter gleichen Mobilitätsverhalten sowie anderen Randbedingungen im Betrieb simuliert werden.

4.2.5.1 Fahrzeugspezifische Daten

Die Klimaschädlichkeit des Smart mit konventionellem Antrieb soll in diesem Kapitel in Bezug auf fahrzeugspezifische Daten ausgewertet werden.

Kraftstoffverbrauch spezifisch

Der spezifische Kraftstoffverbrauch des Smart unterscheidet sich je nach Quelle erheblich. Laut Angaben des Herstellers werden im Schnitt 4.4 l/100 km verbraucht. Doch empirische Messungen von 3020 Smart-Besitzern beim typischen Fahrprofil (siehe Kap. Mobilität) haben jedoch einen erhöhten Verbrauch von 5.9 l/100 km gemessen. [14] Dieser soll aufgrund des realitätsnahen Nachbaus des Modells als Quelle für den Kraftstoffverbrauch des Benziners integriert werden. Die Simulation soll unter Anrechnung von zunehmenden Emissionsminderungen bei Benzin und Diesel, vor allem aufgrund der Beimischung von Biokraftstoffen, entsprechend der geltenden Vorgaben erfolgen. [23]

4.2.5.2 Kraftstoffursprung

Bei Betrachtung der Benzin Vorkette gibt es analog zum Elektrofahrzeug unterschiedliche Bilanzierungsmöglichkeiten. Eine der gängigsten ist die Berechnung der Emissionen pro Liter mit der direkten CO₂-Äquivalenz bei der Verbrennung (Tank-to-Wheel) aus der chemischen Reaktionsgleichung für vollständige Verbrennung. Diese sind direkt proportional zum Kraftstoffverbrauch. Ist der spezifische Verbrauch pro 100 km bekannt, so kann der direkte Emissionsfaktor berechnet werden. Doch fallen zusätzlich indirekte Emissionen in der Vorkette bei der Produktion des Kraftstoffes (Well-to-Tank) an. Beide Emissionen konnten auf Basis von GEMIS in ein Prozessmodul in GaBi nachgebaut und in das Excelmodell exportiert werden. [20, 23]

Tabelle 10: Direkte und indirekte CO₂ Emissionen von Benzin [20, 23]

	CO ₂ -Faktor (direkt und indirekt)	Einheit	CO ₂ -Faktor (direkt)	Einheit
Benzin	2,877	kg/l	2,33	kg/l

Verglichen kann dieser Wert mit den Angaben von ADAC WTW (Well-to-Wheel). Der Ausstoß nach ADAC beinhaltet neben den gemessenen CO₂-Äquivalenz auch die CO₂-Emissionen, welche für die Bereitstellung des Kraftstoffs entstehen. Durch die Well-to-Wheel Betrachtung ist eine bessere Vergleichbarkeit mit E-Fahrzeug möglich. Pro Liter Benzin fallen 2,877 kg CO₂-Äquivalenz an. [1]

4.2.5.3 Emissionen während des Simulationszeitraums

Bei dem gewählten Kraftstoffverbrauch und 130.000 gefahrenen Kilometer Fahrbetrieb emittiert der Smart 19,9 Tonnen CO₂-Äquivalenz. Bei 5,5 Liter Verbrauch pro 100 km können 0,1518 kg CO₂-Äquivalenz pro 1 km berechnet werden. Alle übrigen Annahmen wie u.a. das Mobilitätsprofil oder Lebensdauer des Smart sind zu dem Elektro-Smart identisch.

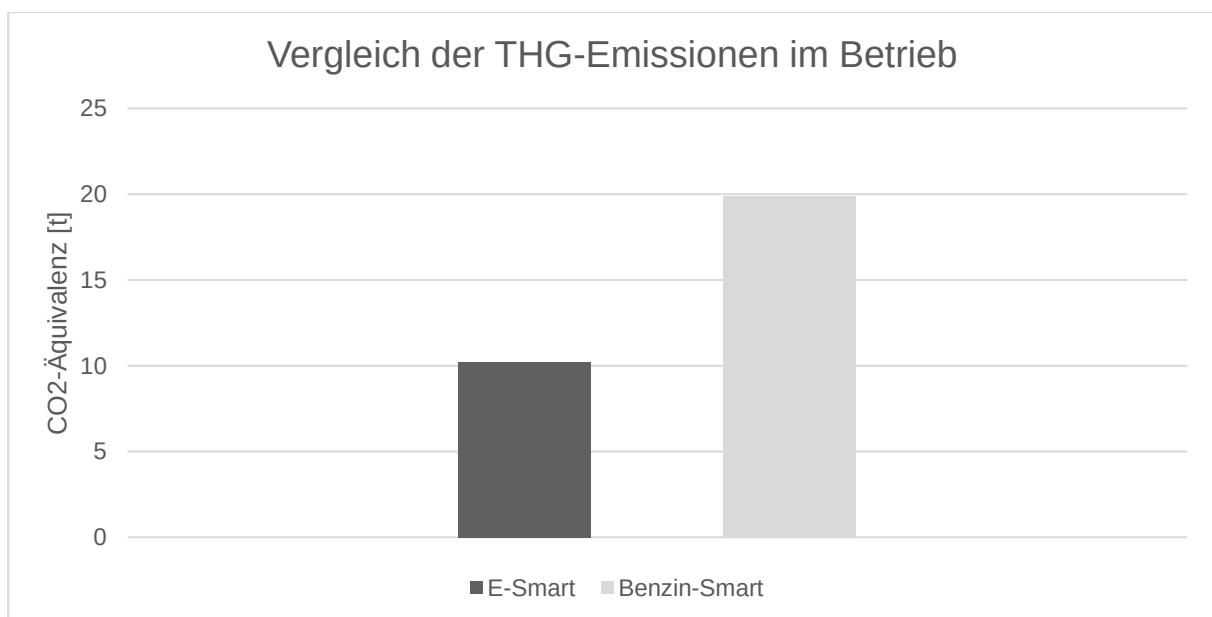


Abbildung 21: Vergleich der THG-Emissionen im Betrieb

4.3 Recycling

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 ersetzt.

In der vorliegenden Studie wurde der Ansatz der Systemerweiterung und Substitution gewählt. Dies liegt an der Zielsetzung der Studie, nicht nur die Ökobilanz eines Elektrofahrzeuges darzustellen, sondern auch den ökologischen Vergleich zwischen Elektrofahrzeug und Benzin Fahrzeug herzustellen. Durch den Ansatz der Systemerweiterung und Substitution wird am Ende, bei der Zusammenführung der Auswirkungen von Herstellung, Nutzung und Recycling ein idealer bilanzieller Vergleich geschaffen.

Die Problematik bei der Darstellung des Recyclings in der Ökobilanz für ein Elektrofahrzeug ist folgende. Es gibt für die Verwertung von Batterien und der Leistungselektronik, die im Elektroauto verbaut sind, noch keine gängigen Recyclingmethoden mit entsprechender Datengrundlage. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei Forschungsprojekte analysiert, welche sich mit der Erstellung einer geeigneten Wiederverwertungs-Prozesskette für eben diese beschäftigt haben. Die Ergebnisse der Untersuchungen fließen als Gutschrift für das Recyceln von Batterie und Leistungselektronik in die Ökobilanz ein. Für den restlichen Teil des Elektroautos erfolgt, wie beim Benzinern die Untersuchung der Altfahrzeugverwertungs-Prozesskette.

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, wird analysiert und als Datengrundlage für die Möglichkeiten des Batterien-Recycling herangezogen.

Des Weiteren wird auch das Recycling der Leistungselektronik des Elektroautos in einer speziellen Elektrorecyclingroute untersucht. Die restliche Basis der Sachbilanz des Recyclings beruhen auf Recyclingwerten für konventionelle PKW's in bestehende Altfahrzeugverwertungsrouten. Dementsprechend wird angenommen, dass bei Elektrofahrzeugen die Lithium-Ionen-Batterie als auch die Leistungselektronik vor der Fahrzeugpresse demontiert wird. Der restliche Teil des Elektrofahrzeuges wird also identisch zum konventionellen Fahrzeug der Altfahrzeugverwertungsrouten zugeführt.

4.3.1 Recycling Lithium-Ionen-Batterie

Wie zuvor erwähnt beziehen sich die auf in diesem Kapitel gemachten Aussagen auf die Ergebnisse des Pilot Projekt LithoRec [24, 25]. Das realisierte Recyclingverfahren, das „LithoRec-Verfahren“ kann unterteilt werden in die vier Hauptprozessschritte, die im folgendem kurz erläutert werden.

1. Batterie- und Modulzerlegung

Im ersten Schritt werden die geschlossenen Zellen der Batterie von dem Gehäuse der Batterie und des Moduls getrennt, auch der Rahmen und die Kabel werden von der Zelleinheit gelöst und dem Recyclingverfahren zugeführt. Bevor die Zerlegung erfolgen kann wird aus Sicherheitsgründen die Batterie tiefenentladen.

2. Zellzerlegung

Im nächsten Schritt wird die Zelle manuell zerlegt. Nach dem öffnen, werden die Elektrolyten mit Lösemittel ausgewaschen und anschließend die Zelle in ihre Einzelteile: Kathode, Anode und Separator zerlegt. Während die Kathode dem nächsten Verfahrensschritt zugeführt wird, sollte die Anode recycelt werden und das verbaute Kupfer zurückgewonnen werden. Der Separator hingegen wird entsorgt.

3. Kathodenseparation

Bei der Weiterbearbeitung der Kathode wird die Beschichtung der Kathode von der Ableiterfolie aus Aluminium getrennt. Dafür kommen mechanische als auch thermische Verfahren zum Einsatz. Die Verfahren laufen unter Verwendung von Strom. Die abgetrennte Beschichtung wird in den Prozessschritt der hydrometallurgischen Aufbereitung überführt. Die Ableiterfolie aus Aluminium wird dem Aluminiumrecycling zugeführt.

4. Hydrometallurgische Aufbereitung

Im letzten Prozessschritt werden die Aktivmaterialien aus der Beschichtung als batteriefähige Materialien aufbereitet. Es werden bei der NMC-Kathode (Lithium-Nickel-Kobalt-Mangan), welche das gängigste Lithium-Ionen-System ist, Kobalt, Nickel und Mangan in einer Sulfatlösung abgetrennt. Das übrigbleibende Lithium wird weiter aufgereinigt und als Lithiumhydroxid gewonnen.

Das Gesamtgewicht der im Elektro-Smart verbauten Li-Ionen-Batterie beträgt 150kg. Aus den zuvor beschriebenen Recyclingschritten ergeben sich folgende Materialgutschriften

Tabelle 11: Recycling Batterie: Materialgutschriften

wiedergewonnene Materialien	BMZ [kg]	ZZ, KS und HA [kg]
Kunststoff	14,4	0
Aluminium	0,195	6,3
Edelstahl	28,95	0
Kupfer	1,8	9,3
Gold	0,00003	0
BMS, Kupfer	0,18	0
Nickel	0,0075	0
Silber	0,0015	0

Cobalt	0	5,85
LiOH	0	6,75
Mangan	0	5,4
Nickel	0	5,7
H ₂ SO ₄ (96%)	0	28,8
Summe	45,53403	68,1
Gesamtsumme		113,63403

Die im Recyclingprozess wiedergewonnene Masse an Materialien von 113,63 kg entspricht einer Materialrückgewinnung der Batterie von 75 %. Die größten Material Rückgewinnungspotenziale ergeben sich bei der Batterie- und Modulzerlegung. Des Weiteren wird das Treibhauspotenzial des Batterie Recyclings aufgeschlüsselt. Die angegebenen Literaturwerte beziehen sich dabei auf eine Masse von 1000 kg und wurden aus diesem Grund umgeformt und auf das Gesamtgewicht von 150 kg der verbauten Li-Ionen-Batterie im Smart bezogen.

Tabelle 12: Gutschriften CO₂-Äquivalente nach Prozessschritten Batterierecycling

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

Es zeigt sich das die Batteriezerlegung die größten Einsparungen des Treibhauspotenziales, bei der Recycling Prozesskette, liefert [26]. Dies ist jedoch nicht der Zerlegung an sich zuzuschreiben, sondern vielmehr dem Recycling der im Batteriegehäuse verbauten Wertmetallen. Die bei der Zellzerlegung 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-CO₂-Äquivalent.

4.3.2 Recycling Leistungselektronik

Eine weitere Besonderheit der Elektrofahrzeuge ist die verbaute Leistungselektronik, sie dient der Transformation der aus der Batterie kommenden Energie, zu der vom Motor genutzten Form. Auch hier hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit ein Projekt gefördert, „Elektrofahrzeugrecycling 2020 Schlüsselkomponente Leistungselektronik“ (ElmoRel 2020) [27], welches die Möglichkeiten des Recyclings der Leistungselektronik untersucht.“ Bisher wurde Leistungselektronik in der traditionellen Autoschredder-Recyclingroute verwertet. Doch aufgrund ihres Gewichtes von 10 – 20 kg und dem hohen Anteil an verbauten seltenen Erden, sollte ein optimiertes Recyclingverfahren standardisiert

werden um die Verluste zu minimieren. Nachdem die Leistungselektronik ausgebaut wurde, empfiehlt sich eine maschinelle Zerlegung. Dafür kam in ElmoRel 2020 eine Prallmühle zum Einsatz. Das Ergebnis ist eine Leiterplattenfraktion, sowie eine Aluminiumfraktion. Während die Aluminiumfraktion in einem weiteren Schritt von Anhaftungen gereinigt werden und anschließend in Aluminiumschmelzwerken eingesetzt werden kann, können die Leiterplatten in bestehenden Elektrorecyclingrouten bearbeitet werden. Weiterhin wurde untersucht ob eine weitere Aufbereitungsstufe der Leiterplattenfraktion ökologisch sinnvoll ist. Dies trifft jedoch nicht zu, da die Gutschrift für die Abtrennung der verbauten Teile und der Herstellung der Sondermetallkonzentrate nicht ausreicht um den ökologischen Mehraufwand durch die dafür benötigten Lösemittel auszugleichen. Nach [5] beträgt das Gewicht des PowerpACs rund 23kg. Zusammengesetzt aus Wechselrichter, Spannungswandler und PDU (Power Distribution Unit). Die Ergebnisse des ElmoRel 2020 wurden pro Tonne Leistungselektronik angegeben und für die Abschätzung der Auswirkungen beim Elektro-Smart auf 23 kg skaliert. Das skalierte Gewicht basiert auf den in Tabelle 12 gemachten Angaben. Tabelle 13 zeigt die zusätzlich zurückgewonnenen Materialgutschriften, wenn die Leistungselektronik statt der Autoshredderroute, einer Elektrorecyclingroute zugeführt wird.

Die Gutschrift für die Vermeidung des Treibhauspotenzials (GWP) pro Tonne Leistungselektronik in der Elektrorecyclingroute beträgt 10.100 kg CO₂-Äquivalent [27]. Dies entspricht bei 23 kg Leistungselektronik einer Gutschrift von 232,3 kg CO₂-Äquivalent.

Tabelle 13: Materialzusammensetzung Leistungselektronik			Tabelle 14: zusätzliche Materialgutschriften durch Elektrorecyclingroute		
Material	Materialanteil	Gewicht [kg]	Material	Gutschrift pro Tonne [g]	Gutschrift für 23kg [g]
Aluminium	51,9 %	11.94	Gold	6.7	0.1541
Kupfer	16,1 %	3.7	Silber	23.5	0.5405
Leiterplatten	8,6 %	1.98	Palladium	1.3	0.0299
Kondensator	5,7 %	1.31	Zinn	527	12.121
Ferrite	4,5 %	1.04			
Stahl	4,7 %	1.08			
Messing	3,8 %	0.87			
Kunststoffe	3,5 %	0.81			
Keramik	0,9 %	0.21			
Widerstand	0,2 %	0.05			
Summe		22.99			

4.3.3 Recycling Altfahrzeuge (Altfahrzeugverwertung)

Für die umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen in Deutschland ist die Altfahrzeug-Verordnung Rechtsgrundlage. Sie beruht auf der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG der Europäischen Union [28]. Diese verpflichtet alle Hersteller die Altfahrzeuge ihrer Marke vom Letzthalter zurückzunehmen und einer geeigneten Entsorgungsrouten zuzuführen bei der entweder 80 % des Leergewichtes des Autos wiederverwendet bzw. stofflich verwertet wird, oder

aber 85 % des Leergewichtes wiederverwendet bzw. verwertet wird. Ab 2015 stiegen diese Quoten auf 85 respektive 95 %. Nach EU-Altfahrzeug-Richtlinie und Altfahrzeug-Gesetz können Fahrzeuge ab 2008 nur die Marktzulassung erhalten, wenn die aufgeführten Recyclingquoten eingehalten werden. Die generelle Prozesskette der Verwertung von Altfahrzeugen ist in der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Bei der Verwertung eines Elektrofahrzeugs, werden aufgrund der Hochwertigkeit der verbauten Werkstoffe von Lithium-Ionen-Batterie und Leistungselektronik, diese Komponenten vor der Autopresse und der anschließenden Werkstoffzerkleinerung ausgebaut. Die Recyclingprozesse von Li-Ion-Batterie und Leistungselektronik werden wie in vorigen Kapiteln beschrieben, getrennt betrachtet.

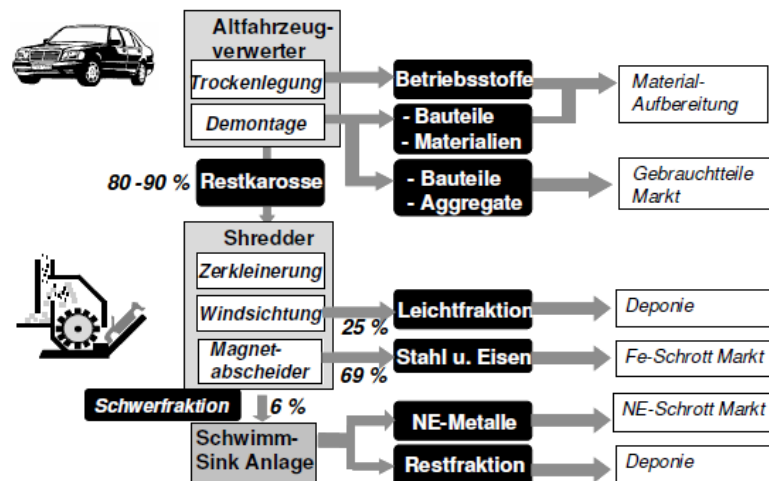


Abbildung 22: Prozesskette Altfahrzeugverwertung [28]

Nachfolgend eine kurze Beschreibung des Prozessablaufs der Altfahrzeugverwertung. Zunächst wird das Altfahrzeug dem Altfahrzeugverwerter zugeführt. In diesem Schritt erfolgen die Demontage und Trockenlegung des Fahrzeuges. Für die demontierten Bauteile gibt es weiterhin zwei Pfade. Entweder finden die Bauteile weitere Verwendung im Gebrauchtteilemarkt, falls erforderlich werden die Bauteile vorher aufbereitet oder werden in dafür vorgesehenen Aufbereitungsverfahren weiterhin verarbeitet. Auch die Betriebsstoffe, also Öl und Bremsstoffe werden in geeigneten Verfahren aufbereitet oder entsorgt. Nachdem die Demontage und Trockenlegung erfolgt ist, wird die Karosserie in einer Fahrzeugpresse gepresst. Von da aus wird diese zum Shredderbetrieb transportiert. Dort erfolgen die Zerkleinerung der Karosserie und die Separierung der Materialien. Es kommt für Metalle der Magnetabscheider, für Nichtmetalle der NE-Abscheider und für die Shredderleichtfraktion der Windsichter zum Einsatz [28]. Nach Separierung werden die gewonnenen Materialien den jeweiligen Märkten zugeführt. Metalle werden in Stahlwerken genutzt und als Sekundärrohstoff wiederverwendet. Nichtmetalle werden in Schwimm-Sink-Anlagen weiter separiert, um die Materialien anschließend den entsprechenden Märkten zuzuführen. Die Shredderleichtfraktion, als auch die Restfraktion wird in Deponien gelagert.

In der Lebenszyklussoftware Gabi und der zur Verfügung gestellten „Education Database“ lag keine ausreichende Datengrundlage zur Simulation des Recyclingprozesses von Altfahrzeugen vor. Aus diesem Grund wurde auf die in der Studie „Altfahrzeuge – Verwertungsquoten 2015 und Hochwertigkeit der Verwertung“ gemachten Angaben zum eingesparten

Treibhauspotenzial durch Recyclingprozesse der einzelnen verbauten Materialien zurückgegriffen. Die Daten dienen dem Ansatz, dass die recycelten Werkstoffe als Sekundärmaterialien die benötigten Rohstoffe der Herstellung ersetzen und können somit als Gutschriften für die Rückgewinnung der verbauten Materialien von den Belastungen der Herstellungsphase substituiert werden. Die Daten setzen sich also zusammen aus dem für die Herstellung benötigte Treibhauspotenzial, abzüglich der beim Recycling auftretenden Materialverluste und das durch den Recyclingprozess auftretende Treibhauspotential zusammen. Folgend daraus kommt die Differenz des Treibhauspotential von Herstellung und der Gutschrift des Recyclings, durch die nicht hundertprozentige Wiederverwertung der eingesetzten Rohstoffe und der ökologischen Belastungen der Recyclingprozesse, wie der Bedarf an Prozessenergie und der Einsatz von Hilfsstoffen, zu Stande. Dementsprechend sollten die Materialgewinnungsquoten somit annähernd 100% betragen um das Recycling möglichst effizient zu betreiben.

Mit Hilfe der angegebenen Daten und der erarbeiteten Sachbilanz, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.;** **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** für den Elektro Smart und dem Benziner Smart wurden die Gutschriften für die Rückgewinnung der einzelnen verbauten Materialien berechnet. Unter Einbezug der Massenanteile sind die verbauten Stoffe, welchen einen Massenanteil von unter 0,5% ausmachen nicht weiter berücksichtigt (ausgenommen der Materialien, für die eine entsprechende Datengrundlage vorlag), weil sie somit keinen relevanten Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz haben. Die Gutschriften dieser Recyclingmethoden werden im Gesamtergebnis auf die Gutschriften des restlichen Fahrzeuges aufsummiert. Die in diesem Kapitel aufgeführte Gutschrift für Gummi, also für die Reifen, gilt für die Mitverbrennung der Reifen im Zementofen.

In der Simulation der Herstellung für die Fahrzeuge mittels GaBi konnten die Umweltauswirkungen der verbauten Textilien nicht dargestellt werden. Um das Ergebnis der Ökobilanz nicht zu verfälschen werden die Textilien auch nicht im Recycling aufgenommen.

Tabelle 15: Werkstoffanteile EFZ

Material	Gewicht [kg]	Massenanteil [%]
Arsen	0.002	0.0002%
Keramik	0.01	0.0012%
Antimon	0.04	0.0049%
Bariumtitanat	0.06	0.0073%
Carbon	0.08	0.0097%
LED	0.1	0.0122%
Messing	0.18	0.0219%
Kunststoffe	0.39	0.0475%
Gusseisen	0.41	0.0499%
Schwefelsäure	0.47	0.0572%
Kondensator	0.55	0.0670%
Wasser	0.83	0.1011%
Magnesium	1.6	0.1948%
Polyethylenterephthalat	1.6	0.1948%
Fiberglas	2.12	0.2581%
Lacke	3	0.3653%
Zink	3.1	0.3775%
Polyamide	3.3	0.4018%
Leiterplatten	3.49	0.4250%
Harz	4	0.4871%
Isoliermaterial	4	0.4871%
Acrylnitril-Butadien-Styrol	5.25	0.6396%
Textilien	6	0.7306%
Andere Metalle	7.9	0.9620%
Öl & Schmierstoffe	9.3	1.1324%
Blei	9.53	1.1604%
andere Kunststoffe	11	1.3394%
Glas	12	1.4612%
Polyurethane	16.4	1.9970%
Polyethylen	20.26	2.4670%
Kupfer	22.14	2.6959%
Gummi (Reifen)	28.39	3.4570%
Polypropylen	55.9	6.8068%
Aluminium	98.84	12.0354%
Stahl	489	59.5440%

Tabelle 16: Werkstoffanteile Benzinzer

Material	Gewicht [kg]	Massenanteil [%]
Arsen	0.002	0.0002%
Antimon	0.04	0.0049%
LED	0.1	0.0123%
Fiberglas	0.12	0.0147%
Schwefelsäure	0.47	0.0577%
Wasser	0.83	0.1019%
Magnesium	1.6	0.1963%
Polyethylenterephthalat	1.6	0.1963%
Fiberglas	2	0.2454%
Schmieröl	2.9	0.3559%
Lacke	3	0.3681%
Zink	3.1	0.3804%
Leiterplatten	3.49	0.4283%
Gusseisen	3.71	0.4553%
Harze	4	0.4909%
Isoliermaterial	4	0.4909%
Polyamide	4.46	0.5473%
Acrylnitril-Butadien-Styrol	5.25	0.6442%
Textilien	6	0.7363%
Andere Metalle	7.9	0.9694%
Öl & Schmierstoffe	9.3	1.1412%
Blei	9.53	1.1695%
Andere Kunststoffe	11	1.3499%
Glas	12	1.4726%
Kupfer	12.28	1.5069%
Polyurethane	16.4	2.0125%
Polyethylen	18.21	2.2346%
Gusseisen	20.65	2.5340%
Gummi (Reifen)	28.35	3.4789%
Polypropylen	59.99	7.3616%
Aluminium	91.14	11.1842%
Stahl	471.48	57.8573%

Gemäß der „EU-Altfahrzeug-Richtlinie“ nach 2015 wird für alle Stoffe eine Recyclingquote von 95% angenommen. Die Verteilung der GWP Gutschriften für die beiden Fahrzeuge in der Altfahrzeugverwertung ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Bei einer 95 % Rückgewinnungsquote der Werkstoffe ergibt sich für den Elektro-Smart eine Gutschrift von 1.619,29 kg CO₂-Äquivalent. Für den Benzinzer Smart beträgt die Gutschrift 1.548,78 kg CO₂-Äquivalent.

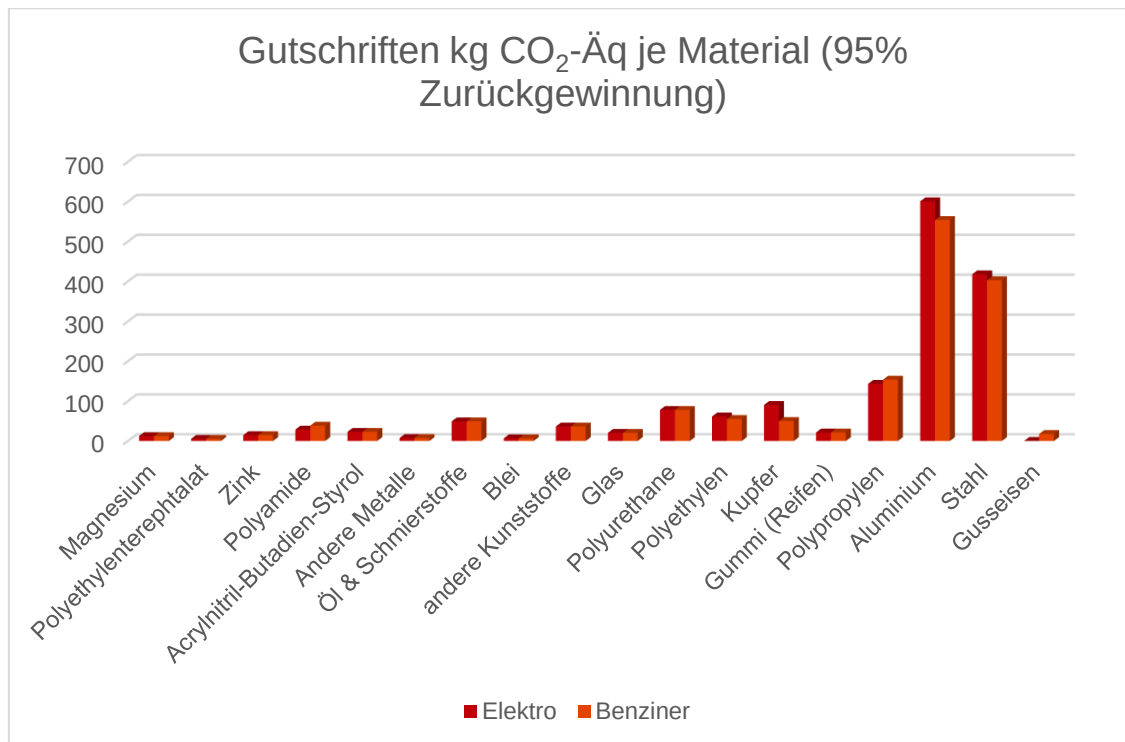


Abbildung 23: Materialspezifische Gutschriften Altfahrzeugverwertung

4.3.4 Stromverbrauch Anlagenkomponenten Altfahrzeugverwertung

In der für die Gutschriften des Recyclingprozesses verwendeten Datenquelle, sind die Umweltbelastungen des Recyclings, bspw. bedingt durch den Energiebedarf der Anlagen schon einbezogen. Die verwendeten Datenmengen lassen sich jedoch nicht darauf hin untersuchen, ob für das Recycling eines Elektroautos ein höherer oder niedriger Energiebedarf, als beim Recycling eines konventionellen Fahrzeuges besteht und ob dieser Einfluss auf das bilanzielle Ergebnis nimmt. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel die Shredderanlage, welcher Bestand der gängigen Altfahrzeugverwertungsrouten ist, auf ihren Energieverbrauch bei der Verwertung der zwei unterschiedlichen Fahrzeugvarianten hin untersucht.

Nach dem der Altfahrzeugverwerter das Auto behandelt und der Fahrzeugpresse zugeführt hat, wird das gepresste Auto dem Shredder Prozess zugeführt. In Shredderanlagen werden die verschiedenen Shredderfraktionen voneinander separiert und anschließend den entsprechenden Verwertungswegen zugeführt. Zu unterteilen ist in die drei Shredderfraktionen Stahlfraktion, Shredderschwerfraktion und Shredderleichtfraktion. Hauptaugenmerk der Shredderanlage ist die Rückgewinnung der Stahlfraktion, welche anschließend als Shredderschrott mit einem Massenanteil von 90%, der Shredderanlage zugeführten Masse, vorliegt. Die restlichen zehn Prozent der Stahlfraktion bilden den Shredderrückstand.

Der Energiebedarf der Shredderanlage wird mittels den in Tabelle 17: Parameter Shredderanlage [28] dargestellten Parametern der Anlagenkomponenten berechnet.

Tabelle 17: Parameter Shredderanlage [28]

Anlagenteil	Nennleistung [kW]	Durchsatz [t/h]	Auslastung
Shredder	680	9.5	0.7
Windsichter	140	4.7	0.7

Magnetabschneider und Förderbänder	150	9.5	0.7
NE-Abschneider	40	0.35	0.9

Gemäß [28] kann durch das shreddern 70 % des Fahrzeuggewichtes als Stahlfraction verwertet werden. Der restliche Anteil fällt zu fünf Prozent als Shredderschwerfraktion und zu 25 % als Shredderleichtfraktion an. Nach dem Shreddervorgang werden im Windsichter die flugfähigen Werkstoffe separiert und im Zyklonabschneider mit den beim shreddern erzeugten Stäuben zur SLF verarbeitet. Ein Förderband transportiert die nicht flugfähigen Materialien, sogenannte Schwerfraktion, in einen Magnetabschneider. Dieser separiert die Schwerfraktion in die magnetische Stahlfraction und die Shredderschwerfraktion, unterstützt durch einen NE-Abschneider.

Nach der Abtrennung der Stahlfraction von den restlichen Materialien liegt die Shredderschwerfraktion, also der nicht-magnetische Anteil der Schwerfraktion und die Shredderleichtfraktion, zusammengesetzt aus Kunststoffen, Glas, Textilien etc., vor. Die Shredderschwerfraktion wird Schwimm-Sink-Anlagen zugeführt und die Shredderleichtfraktion bildet den zu entsorgenden Shredderabfall. Im Fall des Elektro-Smart werden 811,94 kg (abzüglich Öls und Schmierstoffe) und beim Benziner-Smart 805,60 kg der Shredderanlage zugeführt. Aus der zugeführten Masse der Shredderanlage und den in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgeführten Parametern ergibt sich folgender Energiebedarf für die einzelnen Anlagenteile, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Der Energiebedarf der Shredderanlage für den Elektro-Smart beträgt 124,6 kWh, für den Benziner 123,6 kWh. Die Differenz des Energiebedarfs der Shredderanlage der verschiedenen Fahrzeugmodelle beträgt lediglich 1 kWh und nimmt keinen relevanten Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz. Das Treibhauspotenzial des Energiebedarfs der Shredderanlage beträgt unter Annahme einer CO₂-Emission pro kWh von 489g in Deutschland (2017) [30] 60,44(Benziner) - 60,93(Elektro) kg CO₂-Äquivalenz.

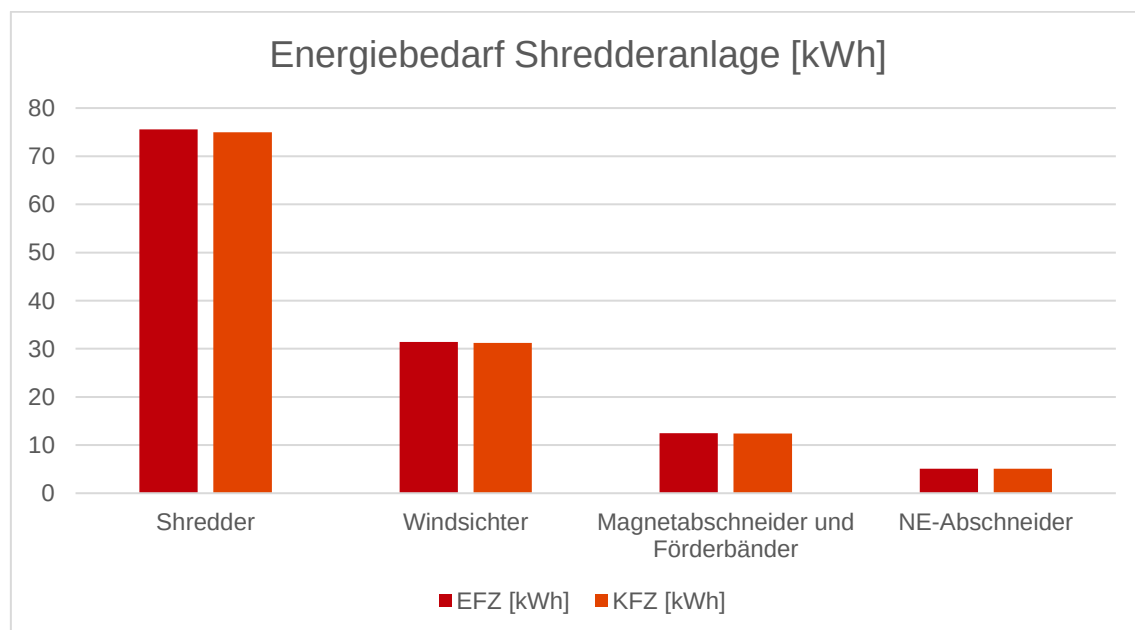


Abbildung 24: Stromverbrauch Shredder

Die Untersuchung der Shredderanlage zeigte also, dass es keinen signifikanten Unterschied im Energiebedarf der Recyclinganlage, für Elektro oder Benziner gibt. Das Ergebnis des Versuches ist an der fast identischen Masse der beiden Fahrzeuge (ca. 6.5 kg Differenz), nach der Demontage und des gesonderten Recyclings der Lithium-Ionen-Batterie und der Leistungselektronik des Elektroautos, zu erklären. Aus diesem Grund wird der Energiebedarf der Anlagenkomponenten in den weiteren Verwertungswegen zur Sekundärrohstoffgewinnung nach der Shredderanlage nicht genauer betrachtet. Dies würde zudem den Umfang der Arbeit überschreiten und hat keine Relevanz für das Ziel der Arbeit einen Vergleich der Ökobilanz von Elektrofahrzeugen und Benzinern herzustellen.

Es lässt sich also zusammenfassend sagen, dass das gesonderte Recycling von Batterie und Leistungselektronik des Elektrofahrzeuges einen Mehraufwand gegenüber der herkömmlichen Altfahrzeugverwertung darstellt und auf diese aufsummiert werden kann. Die restlichen Komponenten des Elektrofahrzeuges werden jedoch identisch zu den Komponenten des Benziners recycelt. Die Differenzen der Gutschriften aus der Altfahrzeugverwertung von Elektroauto und Benziner sind also durch die unterschiedliche Verteilung der Massenanteile zu erklären.

5 Wirkungsabschätzung

In der Wirkungsabschätzung werden die durch die Sachbilanz gewonnenen Daten analysiert und verarbeitet. Am Ende sollen die Umweltauswirkungen eines Produktes über seinen gesamten Lebenszyklus mit Hilfe von definierten Wirkungskategorien dargestellt werden. Die hierzu verwendete Wirkungskategorie beschreibt das Potenzial zur Klimaerwärmung bzw. das Global Warming Potential (GWP). Diese Wirkungskategorie wurde gewählt, da sie sich am besten auf die jeweiligen Lebenszyklusphasen anwenden lässt. Andere Kategorien wie z.B. die Humantoxizität lassen sich oftmals während der Nutzungs- und Entsorgungsphasen nur sehr schwer ermitteln. Außerdem ist die vorhandene Datengrundlage für die gewählte Kategorie am umfangreichsten.

Um die Umwelteinflüsse bemessen zu können muss für die gewählte Wirkungskategorie noch ein entsprechender Wirkungsindikator gewählt werden. Hier wurde die Emission von CO₂-Äquivalenz in die Luft verwendet. Dieser Wirkungsindikator wird sehr häufig für die genannte Wirkungskategorie verwendet. Auch hier ist die Datengrundlage am umfangreichsten.

Am Anschluss sollen die jeweiligen Lebenszyklusphasen separat voneinander untersucht werden. Für jede der drei Phasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung wird eine eigene Wirkungsabschätzung dargestellt. Zusätzlich werden einige Szenarien in die Untersuchung mit einbezogen. Abschließend soll eine ganzheitliche Wirkungsabschätzung stattfinden, in der die drei Lebenszyklusphasen kumuliert betrachtet werden. Auch hier sollen die im Vorfeld analysierten Szenarien Berücksichtigung finden.

5.1 Herstellung

Mit Hilfe von GaBi lassen sich die in der Sachbilanz gewonnen Daten für die Herstellungsphase ganz einfach bilanzieren. Dafür können unterschiedlichste Bilanzierungsmethoden ausgewählt werden. In diesem Fall wurde sich an das vom europäischen Joint Research Centre veröffentlichte „International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook“ gehalten. Dieses beinhaltet Empfehlungen für eine Lebenszyklus-Einflussanalyse im europäischen Kontext [31]. So kann sowohl jedes einzeln simulierte Bestandteil, als auch das jeweilige Fahrzeug im gesamten bilanziert werden.

Für den Elektro-Smart entstehen während des Herstellungsprozesses laut der in GaBi entworfenen Systeme sowie der verwendeten Bilanzierungsmethode insgesamt ca. 3.000 kg CO₂-Äquivalent. Die genaue Aufschlüsselung kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.

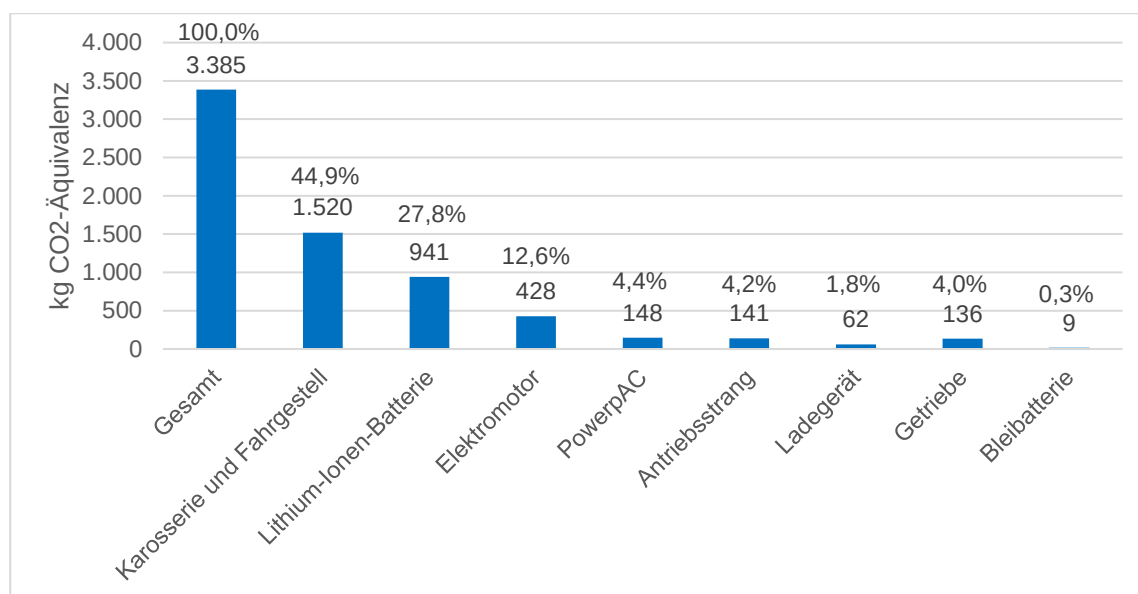
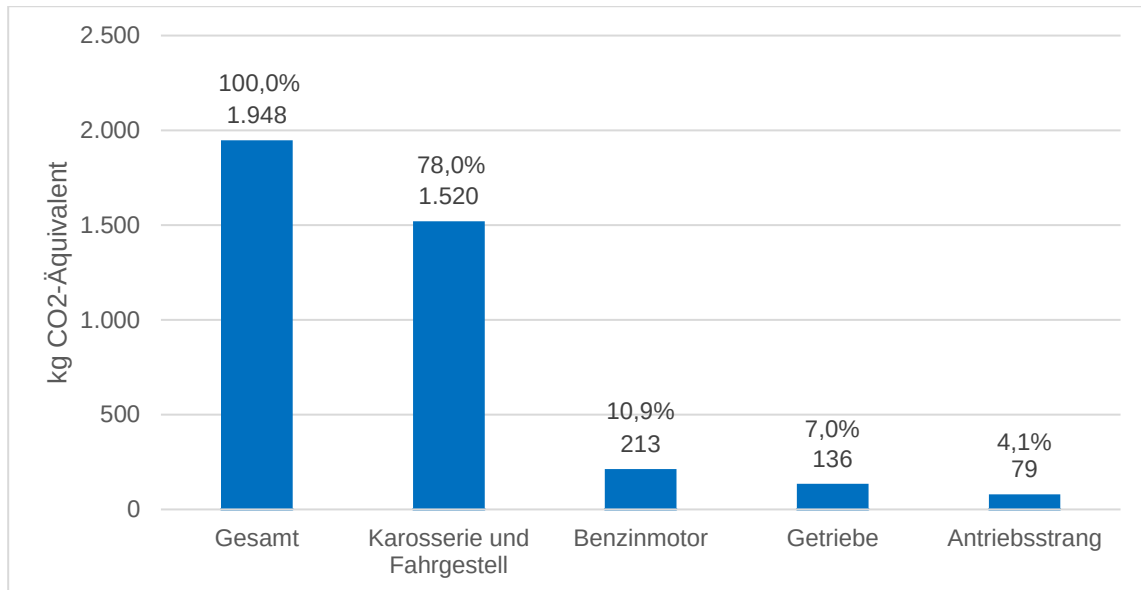


Abbildung 25: Global Warming Potential Elektro-Smart

Es fällt auf, dass Karosserie und Fahrgestell mit einem prozentualen Anteil von ca. 45 % und insgesamt 1.520 kg CO₂-Äquivalenz das größte Potenzial zur Klimaerwärmung besitzt. Dies ist vor allen Dingen darauf zurückzuführen, dass die Stahlproduktion ein sehr Energieaufwendiger Prozess ist. Hier wird sehr viel CO₂-Äquivalenz produziert. Aufgrund des hohen Stahlanteils innerhalb des Systems Karosserie und Fahrwerk wird hier sehr viel CO₂-Äquivalenz emittiert. Ein weiterer Prozess, bei dem sehr viel CO₂-Äquivalenz ausgestoßen wird, ist die Herstellung der Lithium-Ionen-Batterie. Insgesamt beträgt der Ausstoß 941 kg und macht einen Anteil von 28 % des insgesamt emittierten CO₂-Äquivalenz aus. Hier stellt sich vor allem die Herstellung der Aluminiumbleche als sehr CO₂-Intensiv heraus. Zusammen machen die Herstellung der Lithium-Ionen-Batterie sowie Karosserie und Fahrwerk fast 75 % des emittierten CO₂-Äquivalent aus. Als drittgrößte Quelle von CO₂-Äquivalenz stellt sich der Elektromotor mit einer emittierten Menge von 428 kg heraus. Zusammen mit PowerpAC, Antriebsstrang, Ladegerät, Getriebe und Batterie macht die Kombination die restlichen 25 % der emittierten Gesamtmenge aus. Die Bleibatterie hat sich dabei als am wenigsten CO₂-intensiv bei der Herstellung herausgestellt. Hierbei werden nur 9 kg CO₂-Äquivalenz produziert.

Auch für den untersuchten Benzin-Smart wird im Folgenden eine Wirkungsabschätzung bezüglich der Wirkungskategorie Global Warming Potential stattfinden. Bei der Herstellung der betrachteten Smart-Variante entstehen insgesamt ca. 1.950 kg CO₂-Äquivalenz. Die genaue Verteilung der Emission kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.

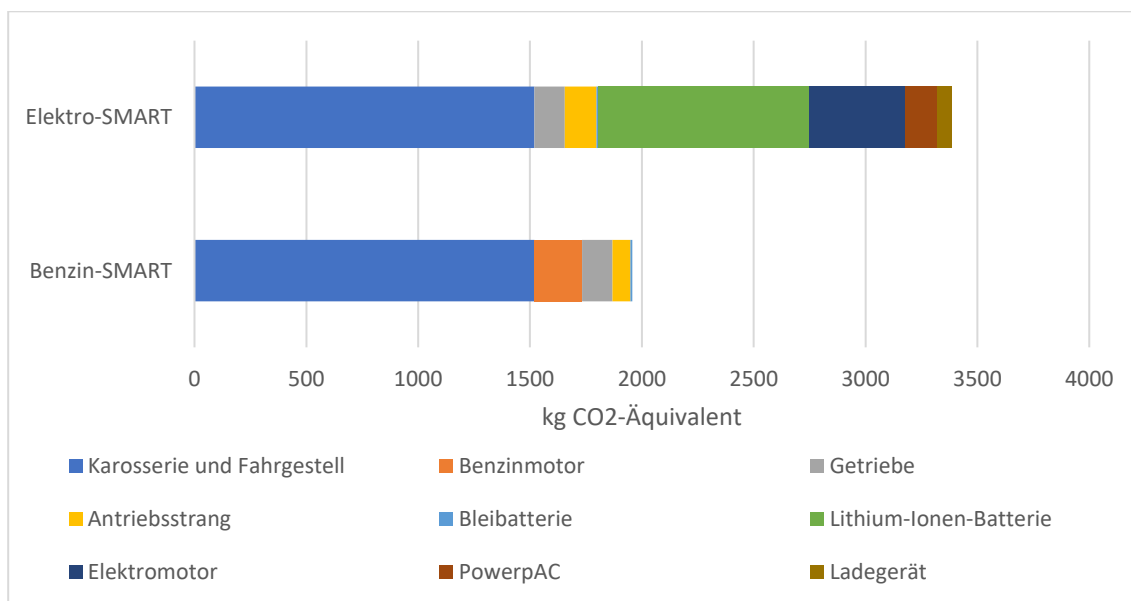
Abbildung 26: Global Warming Potential Elektro-SMART



Da für den Benzin-SMART der gleiche Verbund aus Karosserie und Fahrwerk verwendet wird, liegt die Emission von CO₂-Äquivalent auch hier bei 1.520 kg. Insgesamt machen Karosserie und Fahrwerk ca. 80 % der Gesamtemissionen aus. Auch hier ist der Großteil der Emissionen auf die Herstellung des verwendeten Stahls zurückzuführen. Bei der Herstellung des verbauten Benzinmotors fallen insgesamt 213 kg CO₂-Äquivalent an. Hier fällt die Herstellung des verbauten Aluminiums besonders ins Gewicht. Getriebe und Antriebsstrang machen insgesamt die restlichen 215 kg der Gesamtemission aus.

Beim Vergleich der beiden Smart-Varianten fällt auf, dass der Elektro-Smart deutlich CO₂-intensiver in seiner Herstellung ist. Hier spielt vor allem die Herstellung der Lithium-Ionen-Batterie eine sehr große Rolle. Doch auch die Herstellung des Elektromotors ist verglichen zum Benzinmotor deutlich stärker mit Emissionen behaftet. Eine genaue Gegenüberstellung der beiden Smart-Varianten kann der Abbildung 27 entnommen werden.

Abbildung 27: Vergleich Global Warming Potential Benzin-Smart und Elektro-Smart



5.2 Nutzung

Bei anderweitiger Definition die einzelnen Annahmen, kann der Einfluss auf das Resultat unmittelbar eingeschätzt werden. Es gibt zwei relevante Stellenschrauben, die in diesem Zusammenhang erwähnenswert sind, Ladezeit und „Strommix“.

5.2.1 Anpassung der Ladezeit

Bei einer Veränderung der Ladezeit kann die Auswirkung auf die Klimafreundlichkeit eingeschätzt werden. Unterschiedliche Lademanagementsysteme könnten künftig helfen das Laden wirtschaftlicher oder ökologischer zu gestalten. Systeme wie das „Ampelsystem“ des Grünstromindex beweisen bereits die Funktionsfähigkeit vergleichbarer Ansätze. Hier wird mit vergünstigten Strompreisen versucht, die Elektromobildfahrer zu motivieren bei Stromüberschüssen i.d.R. mittags bei „grünem Strom“ den Akku des Autos zu beladen. [18, 21]

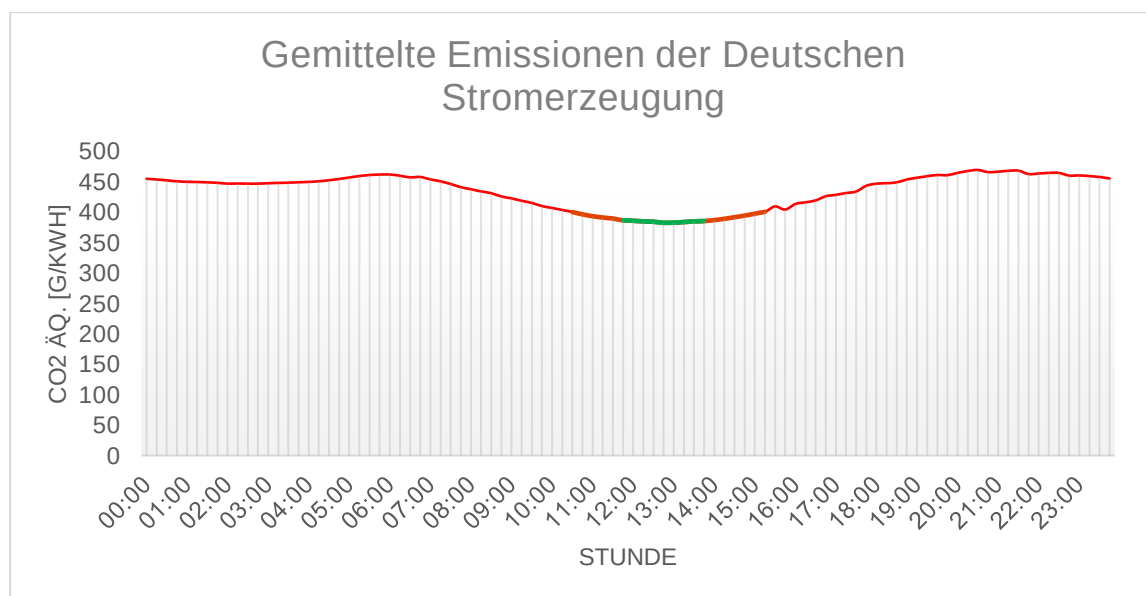


Abbildung 28: Zeitliche Betrachtung durchschnittlicher THG-Emissionen im Referenzjahr 2017

Die Auswertung der Jahressimulation bei dem angenommenen Mobilitätsprofil des Smarts bestätigt die Annahme der klimafreundlichsten Ladezeit. Bei einer täglichen Durchschnittsladezeit von 11:45 bis 13:30 werden 1,01 t CO₂-Äquivalent emittiert. Im Vergleich dazu wurde bei dem „Feierabendlader“ bei der Ursprungssimulation 1,33 t CO₂-Äquivalent und der „Früh-lader“ der zwischen im Schnitt ab 06:30 lädt 1,3 t CO₂-Äquivalent emittiert (siehe Abbildung 29). Da die Prognose einzelner Energieträger sehr vage ist, wird bei dieser Wirkungsabschätzung nur das simulierte Jahr betrachtet.

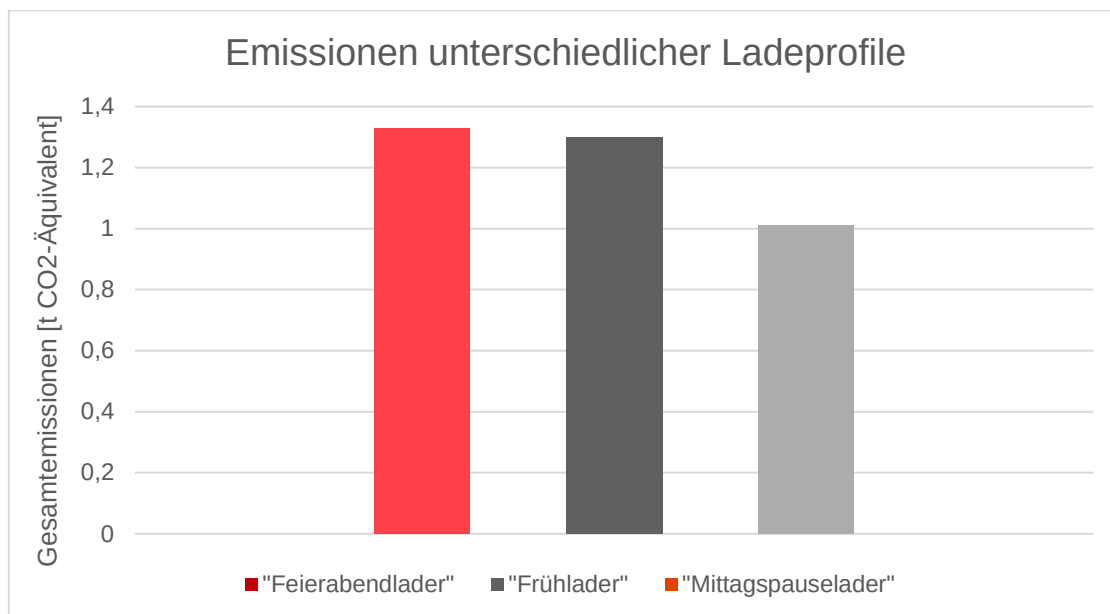


Abbildung 29: Vergleich unterschiedlicher Ladezeiten im Referenzjahr 2017

5.2.2 Grenzszenario Grüner Strommix

Das Ziel der Entwicklung ist die Versorgung von Elektroautos mit zusätzlichem Strom aus erneuerbaren Energieanlagen. Bei einer 100% erneuerbaren Stromproduktion würden deutlich weniger Kohlenstoffdioxid verursacht werden. Jedoch ist hier auch das Verhältnis einzelner Stromerzeuger im Mix nicht zu vernachlässigen, da diese unterschiedliche Vorketten aufweisen. Das positive Treibhausgas-Bilanzergebnis demonstriert das Ergebnis der Grenzbeurteilung. Die Performance der Elektroversion kann durch Variation des Strombezugs erheblich optimiert werden. Das Resultat der Simulation fällt erneut massiv zugunsten des Elektro-Smart aus. Die Klimawirkung der untersuchten Szenarien ist in Abbildung 30 dargestellt. Die Einheit der Darstellung ist dabei t CO₂ - Äquivalent. [1]

Wenn man Grenzfall „Eigene PV-Anlage“ mit Lademanagement betrachtet und davon ausgeht, dass der Smart nur von dem PV Strom geladen werden kann, ist eine Treibhausbelastung von 1.456 kg über den Simulationszeitraum zu erwarten. Anderer Grenzfall wäre beispielsweise das Umweltzeichen „Grüner Strom“ mit 0,18 kg t CO₂ - Äquivalent/ kWh, was lediglich 468 kg t CO₂ - Äquivalent verursachen würde. Die Kriterien der Stromproduktion sind in der Richtlinie "UZ 46 - Grüner Strom" definiert. [20]

Abbildung 30: Vergleich unterschiedlicher Stromszenarien

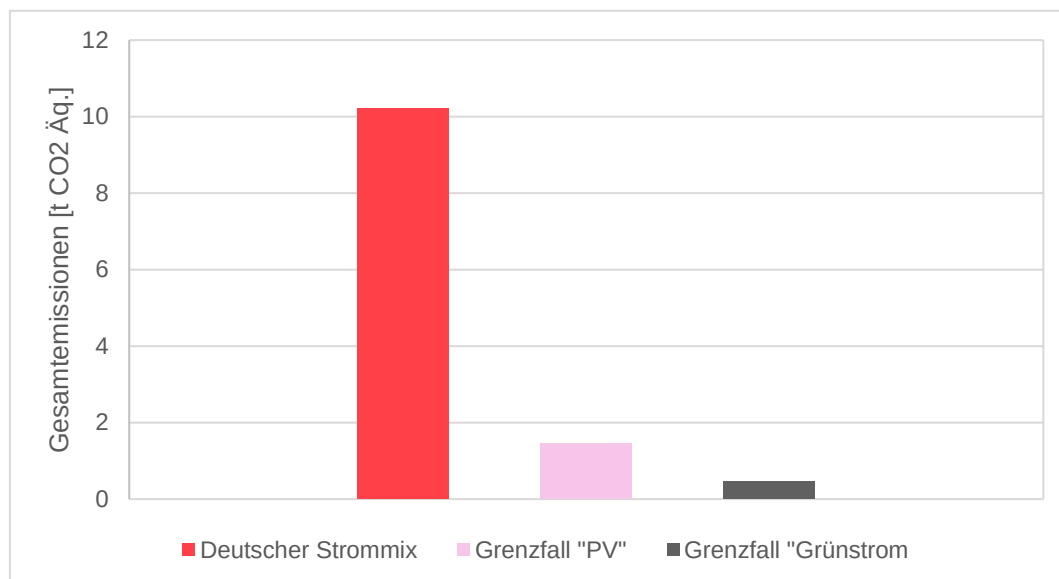


Abbildung 30: Vergleich unterschiedlicher Stromszenarien

5.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Die größte Klimawirkung wird durch den Benzin-Smart verursacht. Über den kompletten Lebenszyklus verursacht dieses Modell Treibhausgasemissionen in Höhe von 19,73 t CO₂ - Äquivalent. Die emittierte Treibhausgasmenge ist fast doppelt so groß wie beim Elektro-Smart der Normalbetrieb lediglich 10,22 t CO₂ - Äquivalent. Die Analyse der Ladezeiten im Referenzjahr 2017 zeigt, dass durch smartes Management und Laden im EU Strom-Mix in der Mittagssonne rund 30 % der THG - Emissionen eingespart werden können. Die Wirkungsabschätzung des Stromursprungs weist den größten Effekt auf die THG-Emissionen des Elektro-Smartes auf. Diese werden bei Eigenladung mit PV auf 1,456 t CO₂ - Äquivalent und bei Betrachtung des „Grünstroms“ auf 0,468 CO₂ - Äquivalent reduziert. Die Messunsicherheit ist dabei relativ groß, da viele unsichere Faktoren wie Ladezeiten oder Prognosen über den Ausbau regenerativer Energien integriert sind. Es besteht jedoch ebenso massive Unsicherheit darüber, inwieweit und zu welchem Zeitpunkt Lastmanagement flächendeckend eingesetzt wird. Eine qualitative Aussage über möglichen Fehlerrahmen ist aufgrund von unzureichender Datenlage der Wahrscheinlichkeit der Fehlerfortpflanzung leider nicht machbar.

Durch die Kombination unterschiedlicher Analysemethoden mittels Integration volkswirtschaftliche Verflechtungseffekte in die Analyse kann der Fehler jedoch minimiert werden. Dadurch ist die Bewertung nun nicht mehr an die Systemgrenze der Ökobilanz gebunden. Außerdem soll die Gesamtbetrachtung für den Fall erhöhter Durchdringungsrate der Elektro-mobile durchgeführt werden. Denn wenn bspw. bedeutende Stromnachfragemengen in Stunden hoher erneuerbarer Stromerzeugung verlagert werden, kann es zu zusätzlichen Netzbelastungen kommen, wenn sich die Stromquellen und -senken an unterschiedlichen Punkten im Netz befinden. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass die flächendeckende Einführung von Elektrofahrzeugen bei hier betrachtetem unkontrolliertem Laden der Fahrzeuge zu einer maßgeblichen Ausprägung neuer Lastspitzen beitragen kann. Lastmanagement bietet hier die Möglichkeit die zusätzliche Stromnachfrage systemverträglich zu integrieren. Bei

Betrachtung von höheren Durchdringungsraten muss der Extrastrombedarf referenzierter betrachtet werden. In diesem Bereich besteht künftig ein großer Forschungsbedarf.

5.3 Recycling

Aus den in Kapitel 3.2.3 getroffenen Annahmen und Berechnungen ergeben sich die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gezeigten GWP Gutschriften. Die Gutschriften für die Altfahrzeugverwertung beider Fahrzeuge verhalten sich relativ ähnlich. Die Altfahrzeugverwertungs-Gutschrift für den Elektro-Smart beträgt 1.619,29 kg CO₂-Äquivalent. Für den Benziner-Smart beträgt diese 1.548,78 kg CO₂-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-Smarts 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.

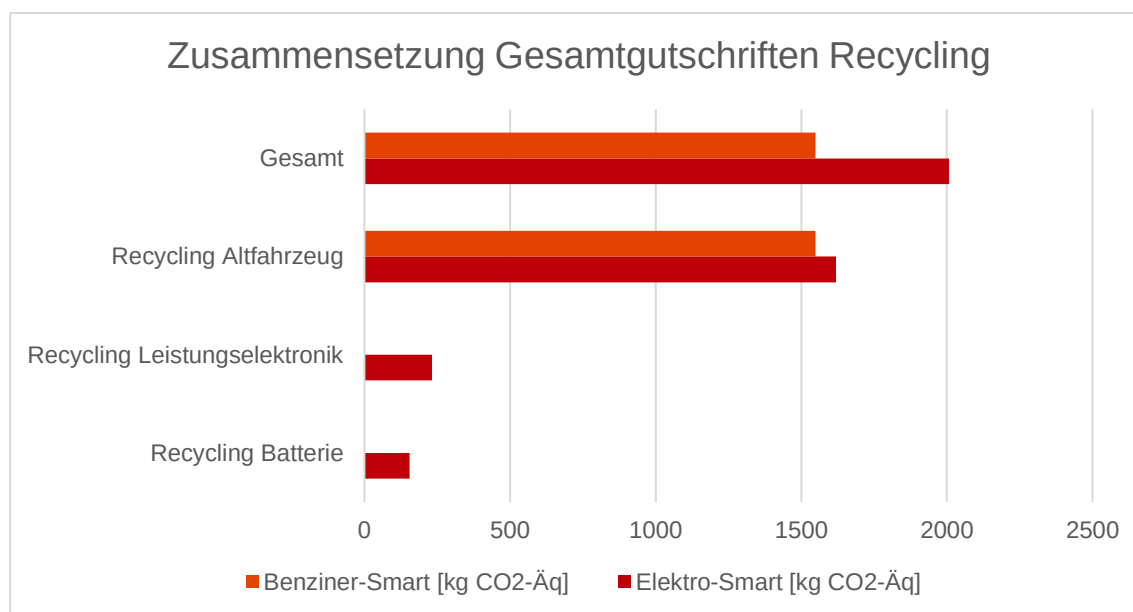


Abbildung 31: Gesamtgutschriften Recycling

Auf die Gutschrift der Altfahrzeugverwertung des Elektro-Smart's werden die Gutschriften für das Recycling der Leistungselektronik, sowie der Batterie, aufsummiert. Es ergibt sich für das Recycling des Elektro-Smartes somit eine Gutschrift von insgesamt 2.006,84 kg CO₂-Äquivalent. Es resultiert eine um 458,06 kg CO₂-Äquivalent höhere Gutschrift für den Elektro-Smart im Vergleich zum Benziner. Vergleicht man diese Gutschrift mit dem in Kapitel 3.3.1 aufgeführten Treibhauspotenzial durch die Herstellung der Batterie von 868 kg CO₂-Äquivalent, im Benziner nicht enthalten, zeigt sich das allein die Herstellung der Lithium-Ionen-Batterie, die erhöhte Gutschrift für das Recyceln des Elektro-Smartes annulliert und weiterhin ins Negative zieht. Somit hat der gesamte Produktzyklus der Batterie einen deutlich negativen Einfluss auf die Ökobilanz des Elektrofahrzeuges.

5.3.1 Lithium Rückgewinnung mittels Pyrometallurgie statt Hydrometallurgische Aufbereitung

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen der Pyrometallurgie im letzten Schritt des Batterierecyclings, anstatt der Hydrometallurgischen Aufbereitung analysiert. Die dafür zugrunde gelegten Daten sind dem Forschungsprojekt LIBRI „Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge“ entnommen. 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 Nettolasten des Recyclingprozesses. Hohen Anteil an den Lasten hat auch die Lithiumcarbonatgewinnung aus der Schlackenaufbereitung. Wird diese Vorgehensweise vermieden und die Schlacke beispielsweise als Zementzuschlag genutzt wird, würde sich auch bei dieser Herangehensweise eine Gutschrift einstellen.

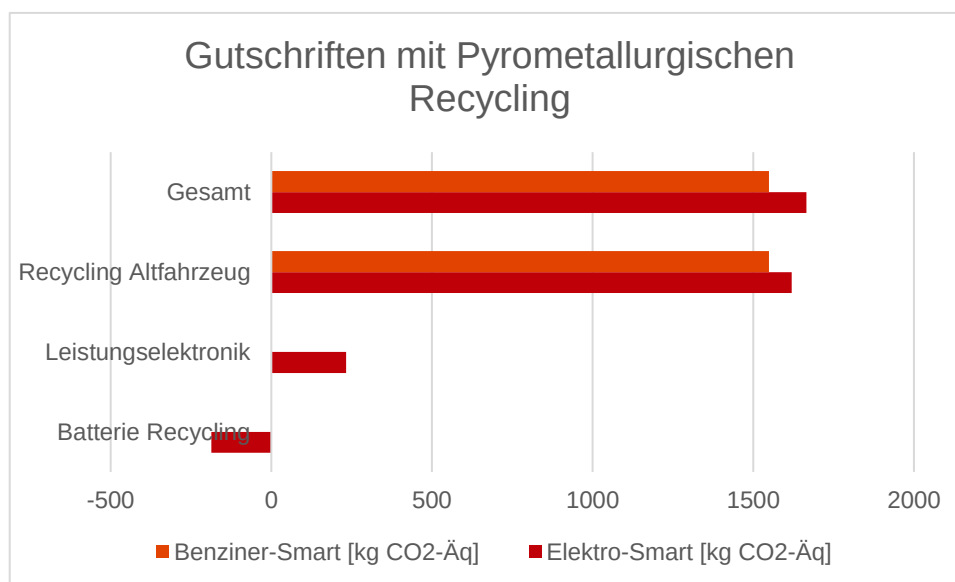


Abbildung 32: Gutschriften bei Recycling der Batterie mittels Pyrometallurgie

Die Veränderung der Gutschriften durch das Recyceln der Batterien mittels Pyrometallurgie wird in Abbildung 32: Gutschriften bei Recycling der Batterie mittels Pyrometallurgie aufgezeigt. Es lässt sich feststellen, dass die Hydrometallurgische Aufbereitung im Vergleich zur Pyrometallurgie deutlich vorteilhaft ist. Durch die Aufbereitung der Batteriematerialien mittels Pyrometallurgie ergibt sich aufgrund des hohen energetischen Mehraufwandes eine Nettolast für eine 150kg schwere Batterie von 186,6 kg CO₂-Äquivalent. Daraus resultiert die Annäherung der Gutschrift des Elektrofahrzeuges, an die zuvor deutlich niedrigere Gutschrift des Benziners. Es ergibt sich eine Gutschriften Differenz von 116,21 kg CO₂-Äquivalent pro Elektrofahrzeug. Jedoch resultiert aus den Ergebnissen eine schlechtere Ökobilanz des Elektrofahrzeuges in Herstellung und Recycling. Entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis hat somit der zu leistende Mehraufwand bei der Produktion und des Recyclings der Lithium-Ionen-Batterie.

5.3.2 Weiterverwendung der Lithium-Ionen-Batterie

Wie in Kapitel 5.3 erklärt nimmt der Mehraufwand der Herstellung der Batterie einen stark negativen Einfluss auf die Ökobilanz des Elektrofahrzeuges gegenüber dem Benzinern. Das anspruchsvolle und aufwendige Recyceln der Batterie kann diese zusätzlichen Umweltbelastungen nicht ansatzweise aufwiegen. Das bedeutet, dass eine Weiterverwendung der Batterie in anderen Produktsysteme einen positiven Einfluss auf die Ökobilanz des Elektrofahrzeugs hat und unter den derzeitigen Bedingungen ökologisch sinnvoller ist, als das Recycling der Batterie. Eine noch funktionstüchtige Batterie, sollte nach Nutzung im Elektroauto Anwendung in einem weiteren System finden, anstatt sie zu verwerten. Dafür eignet sich beispielsweise der Einsatz in einem Batteriekraftwerk. Durch die Weiterverwendung der Batterie in einem Batteriekraftwerk wird die Herstellung einer für das Kraftwerk notwendigen Batterie vermieden. Das bedeutet, dass System (B) in dem die alte Batterie eingeführt wird, erhält eine Gutschrift für die Herstellung der Batterie für das Elektrofahrzeug (System A). Die Ökobilanz des Elektrofahrzeuges wird zwar schlechter, weil die Recycling Gutschriften der Batterie nicht mit einbezogen werden, jedoch verringern sich Systemübergreifend die Umweltbelastungen und das Treibhauspotenzial der beiden Fahrzeugvarianten würde sich annähern. Es ergibt sich eine Differenz des Treibhauspotenzials für Herstellung und Recycling in Höhe von lediglich 164,24 kg CO₂-Äquivalent.

Hinzu kommt, dass die Lithium-Ionen-Batterie ein komplexes Bauteil abbildet, welches aufgrund des hohen Produktionsaufwandes in der Wertschöpfungsstufe höher zu bewerten ist als die einzelnen Materialien. Dementsprechend ist, wenn möglich eine Reparatur und Wiederverwendung der Batterie, ökologisch als auch ökonomisch vorteilbehafteter, vorzuziehen.

5.4 Ganzheitliche Betrachtung

In einer abschließenden ganzheitlichen Betrachtung sollen die drei Lebenszyklusphasen kumuliert betrachtet werden. Da im Vorfeld innerhalb der Einzelbetrachtungen mehrere Szenarien untersucht wurden, werden im Folgenden drei Szenarien für die kumulierte Betrachtung definiert. Da die Betriebsphase den größten Teil der ausgestoßenen CO₂-Äquivalenzen ausmacht, werden in den unterschiedlichen Szenarien auch nur Betriebsparameter aus dieser Phase des Lebenszyklus variiert.

5.4.1 Szenario „Normal“

Im ersten betrachteten Szenario „Normal“ wird die Emission von CO₂-Äquivalenzen bei der Herstellung sowie dem Betrieb unter den momentan gegebenen Bedingungen simuliert. Hier wurde der derzeitige Strommix in Deutschland in die Simulation mit einbezogen. Außerdem wurden die im Vorfeld ermittelten Gutschriften, resultierend aus der Verrechnung des Recyclingprozesses, in dem Szenario berücksichtigt. Die Ergebnisse können Abbildung 33 entnommen werden. Sie zeigt die Auswirkungen der einzelnen Lebenszyklusphasen sowie den kumulierten Ausstoß von CO₂-Äquivalenten.

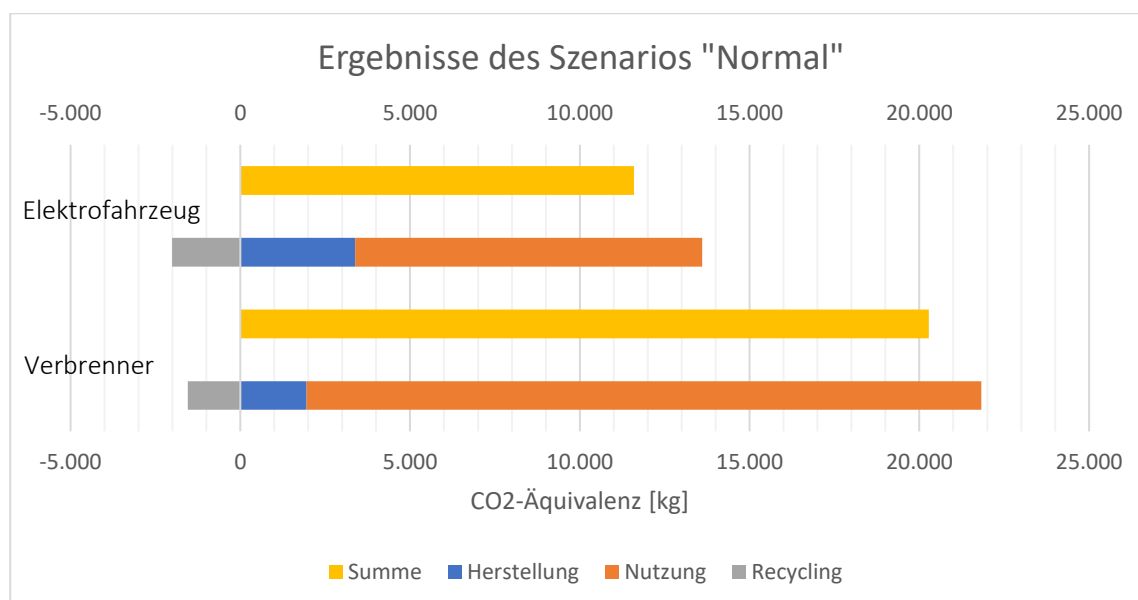


Abbildung 33: Ergebnisse des Szenarios "Normal"

Es fällt auf, dass der betrachtete Elektro-Smart über den gesamten Lebenszyklus deutlich umweltfreundlicher ist. Insgesamt werden über den gesamten Lebenszyklus des Elektro-Smarts ca. 13.600 kg CO₂-Äquivalenzen ausgestoßen. Die Herstellung des Fahrzeuges macht dabei einen Anteil von ca. 25 % aus. Die restlichen 75% sind der Betriebsphase zuzuordnen. Nach der Verrechnung der aus dem Recycling resultierenden Gutschriften von ca. 2.000 kg CO₂-Äquivalenz resultiert ein Wert von ca. 11.600 kg CO₂-Äquivalenz.

Der Verbrenner hingegen ist mit ca. 21.825 kg deutlich schädlicher für die Umwelt. In diesem Szenario beträgt die dem Elektro-Smart zuzuordnende Menge an CO₂-Äquivalenzen lediglich ca. 62 % der vom Benzin-Smart verursachten Menge. Der Elektro-Smart ist in diesem Szenario also deutlich umweltfreundlicher als Benzin-Smart.

5.4.2 Szenario „PV-Strom“

In diesem Szenario wird untersucht wie sich die Verwendung von eigens gewonnenem PV-Strom auf die kumulierte Ökobilanz des untersuchten Elektro-Smarts auswirkt. Wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben wird dabei die Herstellung der benötigten PV-Module mit in die Betrachtung einbezogen. Die Werte für Herstellungs- und Recyclingprozess werden aus dem vorherigen Kapitel übernommen. Die Ergebnisse des betrachteten Szenarios können der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.

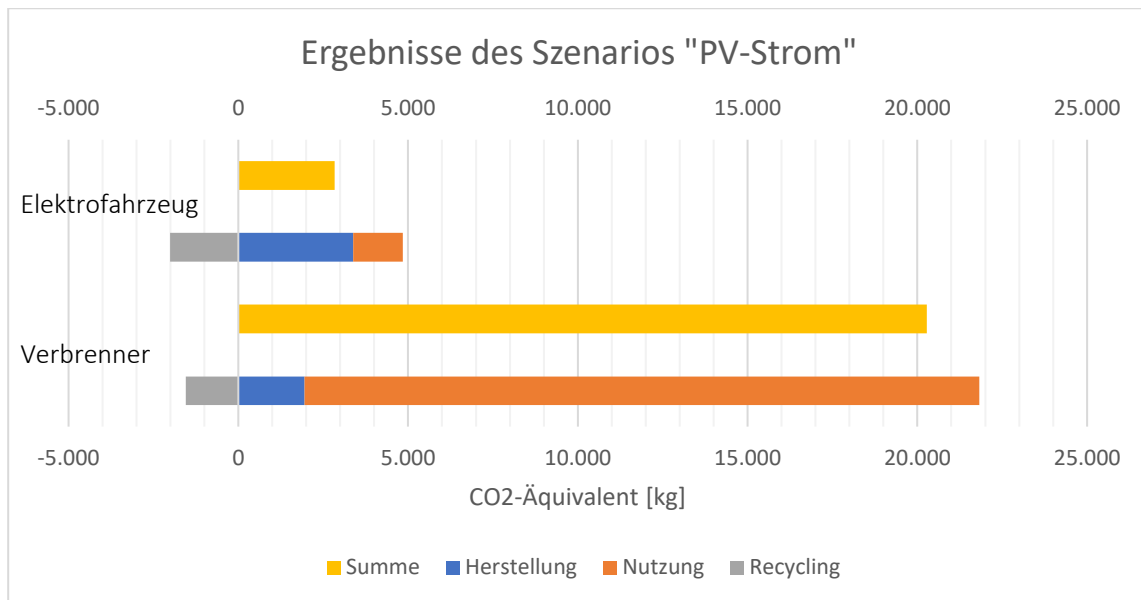


Abbildung 34: Ergebnisse des Szenarios "PV-Strom"

Aus Abbildung 34 kann entnommen werden, dass die kumulierte Menge an ausgestoßener CO₂-Äquivalenz noch einmal deutlich geringer ist, als es im Szenario „Normal“ der Fall war. Hier werden nur etwa 4850 kg CO₂-Äquivalenz ausgestoßen. Unter Einbezug der Gutschriften aus dem Recycling-Prozess reduziert sich dieser Wert weiter auf ca. 2850 kg CO₂-Äquivalenz. Der Betrieb macht dabei nur noch einen Anteil von ca. 30 % aus. Im Vergleich zum Szenario „Normal“ verringert sich dieser Anteil also um 45 %. In diesem Fall macht die über den gesamten Lebenszyklus ausgestoßene Menge CO₂-Äquivalenz nur noch 22 % der Emissionsmenge des Benzin-Smarts aus.

5.4.3 Szenario „Grüner Strom“

Das zuletzt betrachtete Szenario beinhaltet den Strommix bei Bezug von elektrischer Energie gemäß der Richtlinie „UZ 46 – Grüner Strom“ wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben. Hierbei wird fast ausschließlich elektrische Energie aus erneuerbaren Energien bezogen. Die Resultate der Betrachtung können Abbildung 11 entnommen werden.

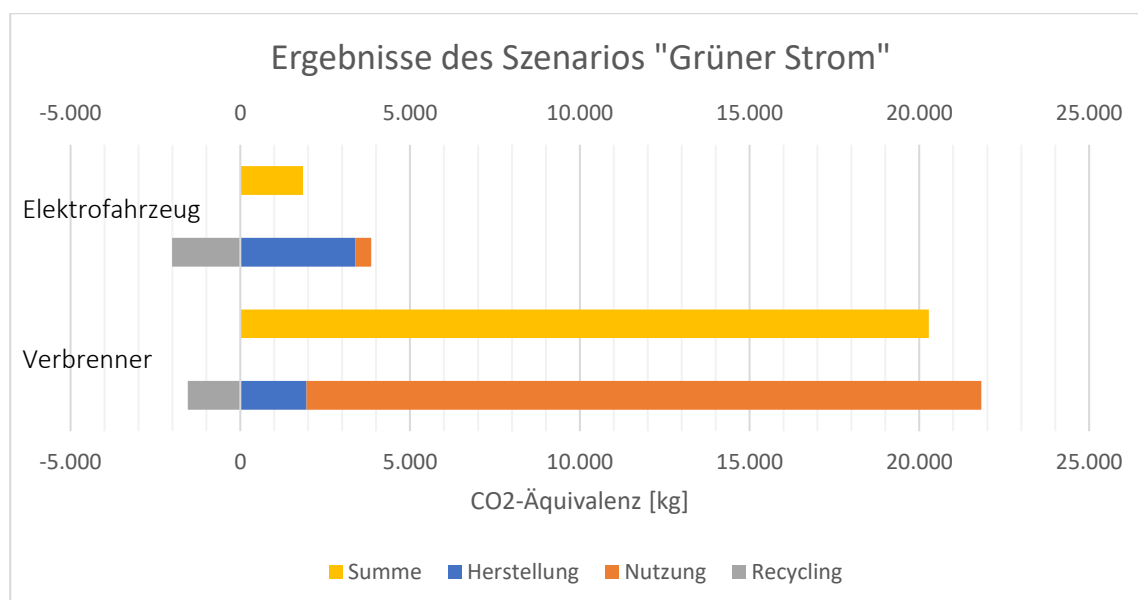


Abbildung 35: Ergebnisse des Szenarios "Grüner Strom"

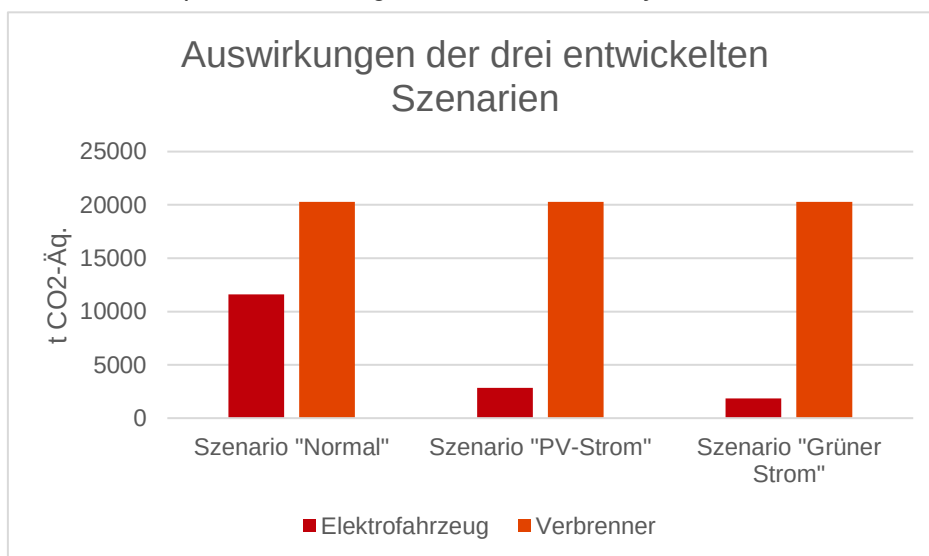
Bei dem Bezug von „Grünem Strom“ fallen die Emissionswerte über den gesamten Lebenszyklus insgesamt am geringsten aus. In diesem Szenario werden lediglich ca. 3850 kg CO₂-Äquivalenz emittiert, von denen bilanziell nach der Berücksichtigung des Recyclingprozesses lediglich ca. 1850 kg übrigbleiben. Hier macht die Herstellung bereits 88 % der gesamten Emissionen aus. Anteilig machen die Emissionen des Elektro-Smarts in diesem Szenario lediglich noch ca. 18 % der Emissionen des Benzin-Smarts aus.

6 Auswertung

6.1 Ergebnisse der Ökobilanz und der Szenarien

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Sachbilanz nochmal aufgeführt und auf Konsistenz geprüft. Es zeigte sich, dass das Elektrofahrzeug im Vergleich zum Verbrenner in der Herstellung deutlich negativ behaftet ist. Die erhöhte Gutschrift beim Recyceln des Elektrofahrzeuges, aufgrund der erhöhten Massen an verbauten Materialien, konnte diesen Nachteil nicht glätten. Zuzuschreiben ist die zusammengefasste erhöhte Umweltbelastung des Elektrofahrzeuges in den Bereichen Herstellung und Recyceln der Lithium-Ionen-Batterie des Elektrofahrzeuges. Die erhöhte Umweltbelastung ist zum einen daran zu erklären, dass die Herstellung der Batterie als komplexes technisches Bauteil mit einem höheren Anteil an verbauten seltenen Erden, ein sehr aufwendiger Herstellungsprozess ist. Zum anderen wirkt sich das noch nicht ausgereifte Recyceln, welches ökologisch als noch sehr uneffektiv zu betrachten ist, nicht positiv genug auf das Ergebnis der Ökobilanz aus um eine gleichwertige Ökobilanz zwischen Elektrofahrzeug und Verbrenner in Herstellungs- und Recyclingphase zu erreichen. Aus diesem Grund ist die weitere Forschung zur Effizienzerhöhung der Entsorgungswege der Batterie von hoher Bedeutung. Die Batterietechnologien sind unter dem derzeitigen Standpunkt noch nicht ausgereift. Aus diesem Grund empfehlen sich weitere Forschungsvorhaben in diesem Bereich um noch ungenutzte Potenziale zu erschöpfen.

Im Vergleich zu Herstellungs- und Recyclingphase der Fahrzeuge, bietet die Nutzungsphase des Elektrofahrzeuges einen deutlichen ökologischen Vorteil gegenüber dem Verbrenner. Schon unter derzeitigen Bedingungen verbessert die ökologisch vorteilhaftere Nutzungsphase des Elektroautos die gesamte Ökobilanz im Vergleich zur Ökobilanz des Verbrenners. Die Nutzungsphase hat also einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz. Aus diesem Grund wurde mit Hilfe von drei entwickelten Szenarien untersucht, wie sich der auf das Ergebnis ausschlaggebende Vorteil der Nutzungsphase des Elektrofahrzeuges, mit Veränderung des dafür relevanten Parameters, die Zusammensetzung des Strommix in Deutschland auswirkt (siehe Abbildung 36: Sensitivitätsanalyse der drei entwickelten Szenarien (eigene Darstellung)).



rien (eigene Darstellung)).

Abbildung 36: Sensitivitätsanalyse der drei entwickelten Szenarien (eigene Darstellung)

Zur Betrachtung der einzelnen Szenarien: Im Standardszenario „Normal“ welches die heutigen Bedingungen für die Herstellung, Nutzung und Recycling abbildet zeigte sich, dass bereits heute die Ökobilanz des Elektrofahrzeuges besser zu bewerten ist, als die des Elektrofahrzeuges. Über die gesamte Lebensdauer der beiden Fahrzeuge resultiert eine Differenz des Treibhauspotenzial in Höhe von 8.676,25 kg CO₂-Äquivalent zu Gunsten des Elektrofahrzeuges. Das bedeutet für die Fragestellung der vorliegenden Studie, welche die immer wieder aufkommende Frage, ob das Elektrofahrzeug wirklich einen ökologischen Vorteil gegenüber der Verbrenner bietet, zu bejahen.

Deutlicher wird dieser ökologische Vorteil bei der Betrachtung der weiteren erzeugten Szenarien. Wird der für das beladen des Elektrofahrzeuges notwendige Strom aus der eigens installierten PV-Anlage auf dem Dach des Eigentümers bereitgestellt, ergibt sich ein erhöhter ökologischer Vorteil gegenüber dem Verbrenner. Es stellt sich in diesem Fall eine Einsparung des Treibhauspotenzial durch die Nutzung eines Elektrofahrzeuges in Höhe von 17.422,09 kg CO₂-Äquivalent ein. Um diese Einsparungen einschätzen zu können wird diese in Kontext zu dem Treibhauspotenzial für die Erzeugung einer kWh Strom nach heutigem Strommix gestellt. Das eingesparte Treibhauspotenzial entspricht dem Treibhauspotenzial einer Stromproduktion von knapp 35.630 kWh. Es lässt sich also resultieren dass die Einsparungen des Elektrofahrzeuges bei der Bereitstellung des Ladestroms aus einer PV-Anlage über die Lebensdauer, gleichzusetzen ist, mit dem jährlichen Treibhauspotenzial der Stromnutzung von fast 9 Einfamilienhäusern.

Das dritte untersuchte Szenario „Grüner Strom“ ist als ein in der Zukunft liegendes Szenario zu betrachten. Hierbei wurde angenommen dass die Stromproduktion in Deutschland fast ausschließlich aus erneuerbaren Energien bereitgestellt wird. Es zeigte sich dass der Strombezug von erneuerbaren Energieanlagen einen nochmals erhöhten positiven Effekt auf die Ökobilanz des Elektrofahrzeugs hat. Es ergab sich eine Differenz in Höhe von 18.430,09 kg CO₂-Äquivalent zu Gunsten des Elektrofahrzeuges.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass sich die Ökobilanz des Elektrofahrzeuges gegenüber dem Verbrenner erst durch die Nutzungsphase positiv einstellt. Unter der Annahme dass sich in Zukunft der Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix in Deutschland immer weiter erhöht ist dementsprechend auch in Zukunft ein immer größer werdender ökologischer Vorteil des Elektrofahrzeuges gegenüber dem Verbrenner zu erwarten. Die einzige stark negativ behaftete Komponente des Elektrofahrzeuges ist die Lithium-Ionen-Batterie. Der Produktlebenszyklus der Batterie als geschlossenes System ist negativ zu beurteilen. Die Erforschung von effizienteren Batterietechnologie, sowie die Einführung optimierter Entsorgungswege, spielt also in Zukunft eine übergeordnete Rolle um den nach heutigem Stand ökologischen Vorteil des Elektrofahrzeuges gegenüber dem Verbrenner weiter zu erhöhen.

6.2 Unsicherheiten und Forschungsbedarf

Bei der Erstellung einer Ökobilanz gibt es diverse Unsicherheiten, auf die es hinzuweisen gilt und die im abschließenden Fazit berücksichtigt werden müssen

Einer der größten Unsicherheitsfaktoren liegt in der Datenquantität und -qualität. Es ist schwierig brauchbare und verlässliche Daten zu generieren, da produzierende Firmen so sensible Daten wie ihre Emissionswerte nur sehr selten veröffentlichen. Bei der Simulation des Herstellungsprozesses wurde deswegen die Software GaBi herangezogen. So konnte gewährleistet werden, dass die Arbeit sich nicht auf zu viele unterschiedliche Quellen bezieht und somit eine Vergleichbarkeit der Daten gegeben ist. Leider konnte aber nur eine kostenlose Version von GaBi verwendet werden. Diese beinhaltet weitaus weniger Prozesse als es bei den kostenpflichtigen Datenbanken der Fall ist. Dementsprechend konnten nicht alle Prozesse innerhalb des Herstellungsprozesses analysiert werden. Da aber für die Herstellung der beiden Fahrzeugvarianten bzw. der gleichen Materialklassen oft die gleichen Prozesse verwendet wurden, ist eine Vergleichbarkeit aber trotzdem gegeben. Die wahren Emissionswerte während der Herstellung dürften aber ein wenig höher ausfallen, als es in dieser Betrachtung der Fall ist. Eine genauere Analyse des Herstellungsprozesses könnte mittels einer solchen kostenpflichtigen Datenbank erzielt werden. Besonders deutlich wurden die geringe Anzahl an Prozessen in der GaBi „Education Database“, bei der Modellierung des Recyclingprozesses. Die Datenbank lieferte keine ausreichende Datengrundlage, weswegen die Simulation des Recyclings in dieser Arbeit auf der Literaturrecherche vorausgehender Studien beruht. Diese Daten eignen sich jedoch auch für einen ökobilanziellen Vergleich der beiden Fahrzeugvarianten, da das Recyceln der im Elektrofahrzeug, aber nicht im Benzinerverbauten Komponenten getrennt betrachtet wurden und somit auch die wesentlichen Unterschiede beim Recyceln der beiden Fahrzeuge herausgearbeitet werden konnten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Bezüglich der Frage, ob ein Elektrofahrzeug über seinen gesamten Lebenszyklus weniger umweltschädlich ist als ein vergleichbares Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, konnte der durchgeführte ökobilanzielle Vergleich einige Antworten liefern.

Als erstes lässt sich festhalten, dass ein Elektrofahrzeug während des Herstellungsprozesses eine deutlich negativere Bilanz aufweist. Dies ist vor allem auf den Einfluss der verwendeten Lithium-Ionen-Batterie zurückzuführen. Über die Betriebsphase verbessert sich die Ökobilanz eines Elektrofahrzeuges allerdings so stark, dass sie am Ende des Lebenszyklus doch positiv im Vergleich zu einem herkömmlichen Fahrzeug ausfällt. Der Betrieb bietet das größte Verbesserungspotenzial hinsichtlich der Reduzierung von umweltschädlichen Emissionen. Während der Nutzungsphase können smart gewählte Ladefenster sowie „grüner Strom“ die Klimabelastung deutlich reduzieren.

Außerdem lässt sich festhalten, dass die Tendenz zum steigenden Anteil erneuerbarer Energien im deutschen Strommix zunimmt. Zukünftig wird die Spanne zwischen den Emissionswerten eines Elektrofahrzeuges und eines herkömmlichen Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor daher weiter auseinander gehen.

Für zukünftige Betrachtungen sollten die Innovationen im Forschungsfeld der Batterietechnik berücksichtigt werden. Momentan arbeiten diverse Forschungsinstitute an alternativen Batterie-Einheiten für Elektrofahrzeuge. Angereizt durch die endlichen Lithium-Vorkommen werden immer neue Materialien für beispielsweise Festkörperelektrolyte gesucht. Ein Forschungsteam der Schweizer Forschungsanstalt Empa arbeitet beispielsweise momentan an Feststoffbatteriezellen auf Basis von Natrium und Magnesium. Von dieser neuen Technologie versprechen sich die Forscher sowohl einen Sicherheitsanstieg, als auch eine starke Erhöhung der maximalen Reichweite. Vielleicht bringt diese neue Batterietechnik auch eine Verbesserung der Ökobilanz mit sich.

Alles in allem kann gesagt werden, dass Elektrofahrzeuge bereits heute eine positive Ökobilanz vorweisen können und dieser Effekt künftig noch positiver ausfallen kann.

Anhang

Anhang 1: Materialzusammensetzung Karosserie und Fahrwerk

Materialgruppe	Material	Anteil	
		%	kg
Eisenwerkstoffe	Herkömmlicher Stahl	49,2	346,8
	Edelstahl	1,9	13,3
	hochfester Stahl	12,0	84,5
	Summe Eisenwerkstoffe	63,1	444,6
Aluminium	Aluminium, Gusslegierung	6,1	43,1
	Aluminium, Knetlegierung	1,5	10,8
	Summe Aluminium	7,6	53,8
Nichteisenmetalle	Magnesium	0,2	1,6
	Kupfer	1,1	7,9
	Blei	0,8	5,5
	Zink	0,4	3,1
	Andere Metalle	1,1	7,9
	Summe Nichteisenmetalle	3,7	25,9
Kunststoffe	Polypropylen (PP)	7,9	55,9
	Polyethylen (PE)	2,3	16,4
	Polyethylenterephthalat	0,2	1,6
	Polyamide (PA)	0,5	3,3
	Polyurethane (PU)	2,3	16,4
	Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	0,7	4,9
	Andere Kunststoffe	1,6	11,0
	Summe Kunststoffe	15,6	109,7
Synthetik	Fiberglas	0,3	2,0
	Harze	0,6	4,0
	Textilien	0,8	6,0
	Glas	1,7	12,0
	Summe Synthetik	3,4	23,9
Sonstige Werkstoffe	Reifen & Gummi	4,0	27,9
	Öl & Schmierstoffe	1,3	9,3
	Isoliermaterial	0,6	4,0
	Lacke	0,4	3,0
	Summe sonstige Werkstoffe	6,3	44,2
Elektronik	LED	0,02	0,1
	Leiterplatte	0,4	2,8
	Summe Elektronik	0,4	3,0
Summe		100,0	705,2

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachtes Verfahren für eine Sachbilanz.	9
Abbildung 2: Wirkungskette innerhalb einer Wirkungsabschätzung	10
Abbildung 3: Beziehungen zwischen Auswertungsphase und den anderen Phasen einer Ökobilanz.....	11
Abbildung 4: Systemgrenzen der Ökobilanz (Eigene Darstellung)	12
Abbildung 4: GaBi Systemaufbau Lithium-Ionen-Batterie	16
Abbildung 5: GaBi Systemaufbau Elektromotor	18
Abbildung 6: GaBi Systemaufbau Ladegerät.....	19
Abbildung 7: GaBi Systemaufbau PowerpAC.....	20
Abbildung 8: GaBi Systemaufbau Batterie-Management-System.....	21
Abbildung 9: GaBi Systemaufbau Antriebsstrang Elektrofahrzeug“	22
Abbildung 10: GaBi Systemaufbau Bleibatterie.....	24
Abbildung 11: GaBi Systemaufbau Getriebe	25
Abbildung 12: GaBi Systemaufbau Karosserie und Fahrgestell	26
Abbildung 13: GaBi Systemaufbau Benzinmotor.....	28
Abbildung 14: GaBi Systemaufbau Antriebsstrang Benzin-SMART	29
Abbildung 15: Wahrscheinlichkeitsdichte der Ankunftszeit	32
Abbildung 16: Generierung des Ladeprofils, eigene Darstellung	32
Abbildung 17: Deutsche Stromerzeugung im Referenzjahr 2017	34
Abbildung 18: Durchschnittliche Emissionen des deutschen Strommix.....	35
Abbildung 19: Prognose THG-Emissionen im Stromsektor.....	36
Abbildung 20: Vergleich der THG-Emissionen im Betrieb.....	37
Abbildung 21: Prozesskette Altfahrzeugverwertung [28].....	42
Abbildung 23: Materialspezifische Gutschriften Altfahrzeugverwertung	45
Abbildung 24: Stromverbrauch Shredder	46
Abbildung 25: Global Warming Potential Elektro-Smart.....	49
Abbildung 26: Global Warming Potential Elektro-SMART	50
Abbildung 27: Vergleich Global Warming Potential Benzin-Smart und Elektro-Smart	50
Abbildung 28: Zeitliche Betrachtung durchschnittlicher THG-Emissionen im Referenzjahr 2017	51
Abbildung 29: Vergleich unterschiedlicher Ladezeiten im Referenzjahr 2017	52

Abbildung 30: Vergleich unterschiedlicher Stromszenarien	53
Abbildung 31: Gesamtgutschriften Recycling	54
Abbildung 32: Gutschriften bei Recycling der Batterie mittels Pyrometallurgie	55
Abbildung 32: Ergebnisse des Szenarios "Normal"	57
Abbildung 33: Ergebnisse des Szenarios "PV-Strom"	58
Abbildung 34: Ergebnisse des Szenarios "Grüner Strom"	59
Abbildung 36: Sensitivitätsanalyse der drei entwickelten Szenarien (eigene Darstellung)...	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: In Lithium-Ionen-Batterie verbaute Materialien	14
Tabelle 2: In Elektromotor verbaute Materialien	16
Tabelle 3: In Ladegerät verbaute Materialien	18
Tabelle 4: In PowerpAC verbaute Materialien	19
Tabelle 5: In Antriebsstrang verbaute Materialien	21
Tabelle 6: In Bleibatterie verbaute Materialien	22
Tabelle 8: In Benzinmotor verbaute Materialien	27
Tabelle 9: Antriebsstrang Benzin-SMART verbaute Materialien	28
Tabelle 9: gesamte Emissionsfaktoren der deutschen Stromerzeugung [19, 21]	34
Tabelle 10: Direkte und indirekte CO ₂ Emissionen von Benzin [20, 23]	37
Tabelle 10: Recycling Batterie: Materialgutschriften	39
Tabelle 11: Gutschriften CO ₂ -Äquivalente nach Prozessschritten Batterierecycling	40
Tabelle 12: Materialzusammensetzung Leistungselektronik	41
Tabelle 13: zusätzliche Materialgutschriften durch Elektrorecyclingroute	41
Tabelle 14: Werkstoffanteile EFZ	44
Tabelle 15: Werkstoffanteile Benzin	44
Tabelle 16: Parameter Shredderanlage [28]	45

Eidesstattliche Erklärung

Wir versichern hiermit, dass die vorgelegte Arbeit in dem gemeldeten Zeitraum ohne fremde Hilfe verfasst und uns keiner anderen als der angegebenen Hilfsmittel und Quellen bedient zu haben.

Köln, den 15. September 2018

Niklas Fuge

Olga Kanz

Philip Schürheck

Literaturangaben

- [1] Benjamin Greiner: Sektorale Emissionspfade in Stromerzeugung. Arbeitspaket 1.2 im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Wissenschaftliche Unterstützung „Erstellung und Begleitung des Klimaschutzplans 2050“ (FKZ UM 15 41 1860) (2016)
- [2] Primary energy efficiency of alternative powertrains in vehicles, Ahnan, M., 2001
- [3] Helmers, E., Dietz, J. u. Hartard, S.: Electric car life cycle assessment based on real-world mileage and the electric conversion scenario. The International Journal of Life Cycle Assessment 22 (2017) 1, S. 15–30
- [4] KBA: Fahrzeugzulassungen (FZ). Besitzumschreibungen und Außerbetriebsetzungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter. FZ16 (2016)
- [5] Ökobilanzierung von Elektrofahrzeugen, Dietz, J., Helmers, E., Türk, O., Beringer, F., Brand, U. u. Walter, J., 2015
- [6] Erzeugungsportfolio 2014. CO₂-Belastung, Energie, 2014
- [7] Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles. Supporting Information, Majeau-Bettez, G., Hawkins, T. R. u. Stromman, A. H., Trondheim, Norwegen 2011
- [8] Der Produktionsprozess eines Elektromotors, Werkzeugmaschinenlabor RWTH Aachen, Aachen, Frankfurt a.M. 2012
- [9] Technischer Anhang der Anleitung für die SEAP-Vorlage: Die Emissionsfaktoren, Konzept der Bürgermeister/innen für lokale nachhaltige Energie
- [10] Electricity-specific emission factors for grid electricity, Brander, M., Sood, A., Wylie, C., Houghton, A. u. Lovell, J., 2011
- [11] Kurzreport Mobilität in Deutschland. Kurzreport Verkehrsaufkommen – Struktur – Trends, infas, Bonn 2018
- [12] Frenzel, Jarass, Trommer: Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung (2015)
- [13] smart fortwo electric drive (inkl. Batterie), ADAC Test, 2013
- [14] Fisch und Fischl GmbH: Deutscher Sprintforum, 2018. https://www.sprintforum.de/de/uebersicht/32-Smart/0-Alle_Modelle.html, abgerufen am: 12.09.2018
- [15] Erstellung und Modellierung von stochastischen Ladeprofilen mobiler Energiespeicher, Litzlbauer, M., Wien 2010
- [16] J. Linssen, A. Schulz, S. Mischinger, H. Maas: Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen. Auswertung des Ladeverhaltens (2013) ISBN 978-3-89336-811-2
- [17] Wieland, T., Reiter, M., Schmutz, E., Fickert, L., Fabian, J. u. Schmied, R.: Probabilistische Methode zur Modellierung des Ladeverhaltens von Elektroautos anhand gemessener Daten elektrischer Ladestationen – Auslastungsanalysen von Ladestationen unter Berücksichtigung des Standorts zur Planung von elektrischen Stromnetzen. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik 132 (2015) 3, S. 160–167

- [18] Dr. Thomas Müller: SMARD- Strommarktdaten, 2018.
<https://www.smard.de/home/marktdaten/78?marketDataAttributes=%7B%22resolution%22:%22hour%22,%22from%22:1535839200000,%22to%22:1536788702279,%22moduleIds%22:%5B%5D,%22selectedCategory%22:null,%22activeChart%22:true,%22region%22:%22DE%22%7D>, abgerufen am: 12.09.2018
- [19] Electricity-specific emission factors for grid electricity, Brander, M., Sood, A., Wylie, C., Haughton, A. u. Lovell, J., 2011
- [20] Uwe R. Fritsche: Bericht zu GEMIS -Datenbank, Version 4.94. Vorkette Stromsektor 2020, 2018. <http://iinas.org/gemis-de.html>
- [21] Umweltbundesamt: CO2-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter, 2018.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-sinken>
- [22] Strom 2030. Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre, BMWi, 2017
- [23] Knitschky, G.: CNG und LPG – Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs. Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima. AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40 (2013)
- [24] Ökobilanz zum "Recycling von Lithium-Ionen-Batterien" (LithoRec), Buchert, M., Jenseit, W., Merz, C. u. Schüler, D., Darmstadt 2011
- [25] Recycling von Lithium-Ionen-Batterien - LithoRec II. Abschlussberichte der beteiligten Verbundpartner, Verbundprojekt im Rahmen des Förderprogramms "Erneuerbar Mobil" des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2016
- [26] 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
- [27] Elektrofahrzeugrecycling 2020. Schlüsselkomponente Leistungselektronik, Bulach, W., Schüler, D., Sellin, G., Schmid, D., Goldmann, D., Buchert, M. u. Kammer, U., 2017
- [28] Ökobilanzierung der Altfahrzeugverwertung am Fallbeispiel eines Mittelklassewagens und Entwicklung einer Allokationsmethodik, Wötzel, K., Braunschweig 2006
- [29] Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Altfahrzeuge - Verwertungsquoten 2015 und Hochwertigkeit der Verwertung. Neuruppin: TK Verlag 2008
- [30] Umweltbundesamt: CO2-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter, 2018.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-sinken>
- [31] The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook, Wolf, M.-A., Pant, R., Chomkhansri, K., Sala, S. u. Pennington, D., 2012
- [32] Ökobilanzieller Vergleich zweier Verwertungsalternativen für Altreifen: Stoffliche Verwertung und Mitverbrennung im Zementofen, Copenhagen Resource Institute, FORCE Technology u. IFEU - Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg, 2009