

Andreas Wurzer, BSc

Bewertung möglicher gesetzlicher Lenkungseffekte auf Basis gesamtheitlicher Lebenszyklusanalysen im Verkehrssektor

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen/Maschinenbau

eingereicht an der

Technische Universität Graz

Betreuer

Assoc.-Prof. Dr. Mario Hirz

Dipl.-Ing. Brunner Helmut

Institut für Fahrzeugtechnik

Graz, April 2016

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material, which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, allen voran bei meiner Mutter und bei meinem Vater, dass sie mir mein Studium ermöglichten und mich all die Jahre unterstützt haben.

Ich danke meinen Geschwistern und meinen Freunden für die Begleitung durch die letzten Jahre.

Weiter möchte ich mich bei meinen Betreuern Helmut Brunner und Hans Schnöll für die Betreuung meiner Masterarbeit bedanken.

Kurzfassung

Mit immer komplexer werdenden Motorentechnologien, welche die Motoren im Betrieb immer sparsamer werden lassen, ist zu erwarten, dass sich das Verhältnis des Energiebedarfs und der resultierenden Treibhausgasemissionen in Produktion und Betrieb von Fahrzeugen in Zukunft weiter in Richtung der Produktion verschiebt. Auf dieser Basis und dem Fakt, dass die Anzahl der Kraftfahrzeuge in Zukunft weiter steigen wird, gewinnt die Produktionsphase von Fahrzeugen hinsichtlich des Gesamt-Energiebedarfs und resultierender Treibhausgasemissionen immer mehr an Bedeutung. Gegenwärtig liegt der Fokus der Gesetzgebung zur Limitierung von Treibhausgasemissionen auf der Regulierung der CO₂-Flottenemissionen im Betrieb der Fahrzeuge.

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der Erfassung des Potenzials möglicher gesetzlicher Lenkungseffekte hinsichtlich des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen während der Produktionsphase von Kraftfahrzeugen. Die Vorgehensweise zur Abschätzung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen basiert auf Daten aus der Literatur bzw. aus Datenbanken, die nach ISO 14040 und ISO 14044 erstellt worden sind.

In vorangegangenen Arbeiten wurden bereits verschiedene Antriebskonzepte und Karosserieleichtbaukonzepte analysiert. In dieser Arbeit wurden weitere Fahrzeugkomponenten wie Lenkrad, Cockpit und Sitze im Interieur sowie die Scheiben und Behälter im Motorraum und Elektronikbauteile wie Kabelbaum, ECUs und Starterbatterie für verschiedene Fahrzeugsegmente analysiert, um eine Abschätzung des Produktionsaufwandes dieser Bauteile geben zu können.

In einem weiteren Schritt wurde ein erweiterbares Modul-Konzept entwickelt, um die Daten der ausgewählten Fahrzeugbauteile dieser Arbeit zu organisieren und die Daten aus vorangegangenen Arbeiten zu integrieren. Mit diesem Modul-Konzept als Werkzeug können verschiedene Fahrzeuge konfiguriert und für weitere Verwendungen in einer Fahrzeugbibliothek gespeichert werden.

Um den Einfluss möglicher gesetzlicher Reglementierungen für Fahrzeughersteller und Zulieferer festzustellen, wurden zwei unterschiedliche Lenkungseffekte am Beispiel Lenkrad und Cockpit untersucht. Für die Bewertung der gesamtheitlichen Treibhausgasemissionen aus der Produktion und Nutzung von Fahrzeugen wurden diese mit der aktuellen bzw. zukünftigen CO₂-Gesetzgebung verglichen.

Abstract

It is expected that the relation of energy demand and greenhouse gas emissions between the phases of production and use of a vehicle will slide to the direction of production due to increasingly complex engine technologies, which make the engines more economical in the in-use mode. On this basis and on the fact that the number of vehicles will increase in future, the importance of vehicle production phase will also increase with regard to energy demand and greenhouse gas emissions. Currently, the legislation focuses on CO₂-fleet emissions, which are produced during the phase of the use.

This master thesis deals with the evaluation of possible effects by various legislation strategies for the automotive industry regarding energy demand and greenhouse gas emissions during the production phase. The approach for the assessment of energy demand and greenhouse gas emissions during the production phase is based on data from literature or other databases, which have been generated by the standards of ISO 14040 and ISO 14044.

In two preceded theses, various concepts of drivetrains and lightweight body concepts were analysed. In this thesis, further vehicle components such as steering wheel, cockpit, seats in case of the interior and the windows, fluid- and other containers in the motor area as well as electronic components such as the wire harness, electronic control unit (ECU) and the starter battery were analysed for several vehicle size classes, focusing on the efforts required for production.

Furthermore, an adjustable and extendable module-concept was developed. This concept allows the organisation of data regarding the chosen vehicle components as well as the implementation of data provided by the other preceding theses. The use of this tool enables the creation of different vehicles and save them in a vehicle-pool for further utilization.

To identify the influence of possible regulations for automotive manufacturer and the supplier industry, two different legalisation effects were analysed by the examples of the steering wheel and the cockpit. For the evaluation of the overall greenhouse gas emissions from production and use of vehicles, the resulting greenhouse gas emission were compared with the current and future CO₂-legislation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ziele	2
1.2	Vorgehensweise.....	3
2	Bedeutung des Treibhausgaseffekts	4
2.1.1	Betrachtung der Treibhausgase im Verkehrssektor	5
2.1.2	Bedeutung des Verkehrssektors für die globalen CO ₂ -Emissionen	5
2.1.3	Situation der CO ₂ -Emissionen in der Europäischen Union.....	6
2.1.4	Situation der CO ₂ -Emissionen in Österreich	6
3	Aktuelle gesetzliche Rahmenbedingungen zur Ermittlung der CO ₂ - Flottenemissionen und Entwicklung in naher Zukunft.....	7
3.1	Aktuelle Gesetzgebung in der EU	8
3.1.1	Überwachung und Meldung der Emissionen.....	8
3.1.2	Zielvorgaben für die spezifischen CO ₂ -Emissionen.....	8
3.1.3	Übergangsphase „Phase in“.....	9
3.1.4	Begünstigungen	9
3.1.5	Abgabe für Emissionsüberschreitungen.....	10
3.1.6	Ausnahmen	11
3.1.7	Prüfzyklus.....	11
3.2	Aktuelle Gesetzgebung in den USA	12
3.3	Aktuelle Gesetzgebung in Japan.....	13
3.4	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP).....	15
3.4.1	Auswirkungen des WLTP auf die Gesetzgebung	16
3.4.2	Einführung des WLTP in der EU	17
3.5	Real Driving Emissions	17
4	Life Cycle Assessment (LCA) – Ökobilanz.....	19
4.1	Geschichte des Life Cycle Assessment	19
4.2	Begriffsdefinitionen nach ISO 14040	21
4.3	Durchführung einer Ökobilanz nach ISO 14044.....	22
4.3.1	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	23

4.3.2	Sachbilanz.....	23
4.3.3	Wirkungsabschätzung.....	25
4.3.4	Auswertung	26
5	Analyse von Massen- und Werkstoffanteilen ausgewählter Fahrzeugkomponenten 28	
5.1	Allgemeines zu Fahrzeugsegmenten und zum Aufbau eines Fahrzeuges ..	28
5.2	Methodik zur Fahrzeugkomponentenanalyse.....	29
5.2.1	Fahrzeugkomponentenanalyse	30
5.3	Massen- und Werkstoffbilanz der Komponenten.....	32
5.3.1	Cockpit.....	32
5.3.2	Lenkrad	33
5.3.3	Fahrersitz, Beifahrersitz, Rückbank	35
5.3.4	Windschutzscheibe, Seitenscheiben, Heckscheibe	38
5.3.5	Ausgewählte Komponenten im Motorraum	40
5.3.6	Bordelektronik (ECUs, Batterie, Kabelbaum)	41
5.3.7	Airbags.....	44
5.4	Zusammenfassung der durchschnittlichen Massen der untersuchten Komponenten.....	45
5.5	Prüfung des Anteils erfasster Massenanteile	46
6	Durchgeführte Analysen zur Ermittlung der Produktionsdaten	47
6.1	Allgemeines zur Sachbilanz der Produktion	47
6.1.1	Methodik zur Ermittlung der Produktionsdaten.....	48
6.2	Limitierungen, Annahmen und Untersuchungsrahmen	53
6.2.1	Allgemeine Annahmen	53
6.2.2	Untersuchungsrahmen der verwendeten Quellen	56
6.3	Ermittlung der Produktionsdaten	56
6.3.1	Magnesium.....	56
6.3.2	Aluminium	63
6.3.3	Stahl.....	66
6.3.4	Kunststoffe	72

6.3.5	Textilien.....	77
6.3.6	Glas.....	80
6.3.7	Elektronik	82
6.3.8	Airbag.....	89
6.4	Produktionsaufwand der Fahrzeugkomponenten	90
6.4.1	Lenkrad	91
6.4.2	Cockpit.....	92
6.4.3	Sitze	94
6.4.4	Scheiben	95
6.4.5	Elektronik	96
6.4.6	Motorraum.....	97
6.4.7	Airbags.....	98
7	Erstellung eines Modul-Generators zur Zusammenfassung erhobener Daten .	100
7.1	Produktionsbedarf für ein generiertes Fahrzeug	101
8	Einflusses möglicher gesetzlicher Lenkungseffekte in der Produktion	104
8.1	Lenkungseffekt Rezyklatanteil.....	104
8.1.1	Beispiele für den Einsatz von Rezyklat im Automobilbau.....	106
8.2	Lenkungseffekt regenerative Energie.....	107
8.2.1	Beispiele für den Einsatz regenerativer Energie in der Produktion	110
8.3	Beispiel für Umweltschutzgesetze in der Produktion.....	110
9	Gesamtheitliche Betrachtung der Treibhausgas-emissionen eines Fahrzeugs	111
9.1	Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugproduktion.....	111
9.2	Treibhausgasemissionen des Fahrzeugbetriebes	113
9.3	Vergleich der CO ₂ -Gesetzgebung mit den resultierenden Treibhausgasemissionen einer gesamtheitlichen Betrachtung	115
	Conclusio.....	119
10	Literaturverzeichnis	121
11	Abbildungsverzeichnis.....	126
12	Tabellenverzeichnis.....	130
13	Abkürzungsverzeichnis.....	133

14	Formelverzeichnis	134
15	Formelzeichen	135
	Anhang A (Typbezeichnung der untersuchten Fahrzeuge)	1
	Anhang B (Massen- und Werkstoffbilanz untersuchter Baugruppen)	3
	Anhang C.....	10
	Anhang D (Ermittelte Produktionsdaten)	20

1 Einleitung

Der globale Klimawandel wird als eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts angesehen. Der anthropogene¹ Treibhauseffekt gilt dabei als Hauptursache für den Klimawandel und sorgt für eine Erhöhung der globalen Luft- und Wassertemperaturen. Dieser Temperaturanstieg hat die Verschiebung von Klimazonen zufolge und somit weitreichende Auswirkungen für die Menschen sowie die Tier- und Pflanzenwelt. Ergebnisse dieser Klimaveränderung sind beispielsweise die Erhöhung des Meeresspiegels, die Veränderung der Meeresströmungen und die Zunahme von Wetterextremen. Als Grund für diese Erwärmung gelten die steigende Konzentration der freigesetzten Treibhausgase in der Atmosphäre und die dadurch veränderte Reflexion der Sonneneinstrahlung. Besondere Bedeutung kommt dabei dem Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO₂) zu. CO₂ wird unter anderem bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen bzw. bei der Erzeugung von Energie oder Wärme erzeugt. Im Verkehrssektor werden diese fossilen Brennstoffe für den Antrieb der Fahrzeuge verwendet und sind somit eine Quelle für den anthropogenen Treibhausgaseneffekt und mitverantwortlich für dessen Folgen. Der International Energy Agency² zufolge sind global rund 17 % der gesamten CO₂-Emissionen auf den Straßenverkehr zurückzuführen. Durch das stetige Wachstum des Verkehrsaufkommens werden die CO₂-Emissionen bzw. die Treibhausgasemissionen in diesem Sektor in Zukunft weiter ansteigen und damit auch die Bedeutung dieses Sektors. In Abbildung 1 ist die Entwicklung der Anzahl an Personenkraftwagen zwischen 1995 und 2012 ersichtlich.³ Besonders in Europa ist in diesem Zeitraum die Anzahl der PKW um mehr als 50 Mio. angestiegen.

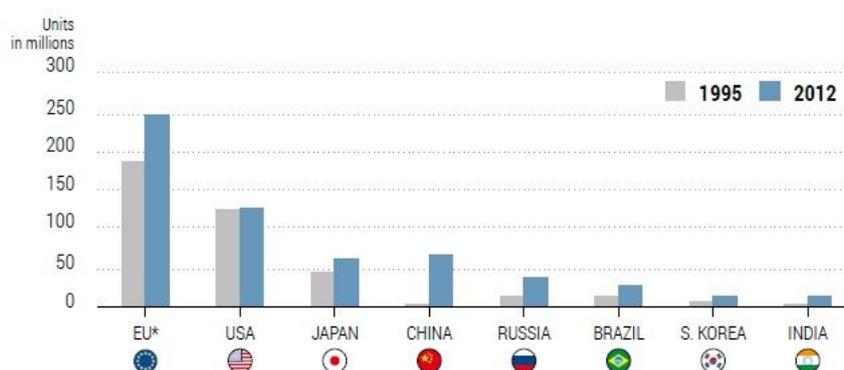


Abbildung 1: Entwicklung der PKW-Anzahl zwischen 1995 und 2012.⁴

¹ von Menschen verursacht.

² Vgl. (International Energy Agency, 2015)

³ Vgl. (Wansart, 2012), S. 1.

⁴ (European Automobile Manufacturers Association, 2014), S. 71.

Um die steigenden CO₂- bzw. Treibhausgasemissionen, welche durch Verkehr und Industrie freigesetzt werden, einzugrenzen, wurden im Jahr 1997 mit dem Kyoto-Protokoll erstmals verbindliche Zielwerte für die Treibhausgasemissionen in Industrieländern beschlossen. Die Europäische Union verpflichtete sich 2007 zu einer Senkung der Treibhausgasemissionen bis 2020 um mindestens 20 % im Vergleich zum Jahr 1990. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde 2007 eine Verordnung zur Senkung der CO₂-Emissionen von PKWs und leichten Nutzfahrzeugen verabschiedet. Diese Verordnung reglementiert die CO₂-Emissionen im Betrieb des Fahrzeugs (siehe Kapitel 3).⁵

Mit zunehmender Komplexität verschiedener Technologien im Fahrzeug zur Reduktion von Treibhausgasen erhöht sich unter Umständen der Aufwand in der Herstellung von Komponenten. Dies lenkt den Blick auf die Produktion und den hier benötigten Energiebedarf bzw. die dadurch entstehenden Treibhausgasemissionen eines Fahrzeugs. Laut Lienkamp⁶ liegt das Verhältnis des Energieeinsatzes zwischen Produktion und Betrieb von konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor bei etwa 10:90. Durch moderne, sparsame Motoren verschiebt sich das Verhältnis weiter in Richtung Produktion. Bei Fahrzeugen mit Elektroantrieb liegt das Verhältnis im Bereich von 50:50. Dies zeigt, dass neben der Nutzungsphase die Produktionsphase des Fahrzeugs stärker in den Fokus der Politik bzw. der Gesetzgebung rücken sollte. Nicht nur die Fahrzeughersteller werden hier in die Verantwortung gezogen, auch die Zulieferindustrie gewinnt immer mehr an Bedeutung, da sich die Wertschöpfungskette in den letzten Jahren Richtung Zulieferer verlagert.⁷

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich deshalb mit dem Potenzial möglicher Lenkungseffekte der Gesetzgebung auf die Hersteller- und Zulieferindustrie im Verkehrssektor.

1.1 Ziele

Ziel dieser Arbeit ist die Erfassung des Potentials möglicher gesetzlicher Lenkungseffekte unter Einbeziehung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen während der Fahrzeugproduktion. Um den Einfluss möglicher Lenkungseffekte ermitteln zu können, sollen Energiebedarf und Treibhausgasemissionen ausgewählter Baugruppen des Fahrzeugs ausgehend vom Prozess der Rohstoffgewinnung bis hin zur Produktion analysiert werden. Aus diesen Daten und den Daten aus vorangegangenen Untersuchungen soll ein Konzept zur

⁵ Vgl. (Wansart, 2012), S.1; vgl. (Europäische Union, 2009), S. 1.

⁶ Vgl. (ATZ, 2012)

⁷ Vgl. (ATZ, 2012), S. 566f; vgl. (Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski, 2009), S. 32.

Einbindung aller Daten erarbeitet werden. Basierend auf den Ergebnissen des Produktionsaufwandes, sollen mögliche Lenkungseffekte durch die Gesetzgebung abgeleitet werden.

1.2 Vorgehensweise

Um einen Überblick über die gegenwärtige Situation der Treibhausgasemissionen und der Gesetzgebung im Verkehrssektor zu bekommen, wurde eine Literaturrecherche zu diesen Themengebieten durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Recherche sind in den ersten Kapiteln näher beschrieben.

Anschließend wurde eine Werkstoff- und Massebilanz für unterschiedliche Fahrzeugkomponenten in verschiedenen Fahrzeugsegmenten durchgeführt (siehe Kapitel 5). Als Werkzeug für die Erstellung dieser Bilanzen diente die Datenbank von A2MAC. Dafür wurden die Fahrzeugkomponenten Lenkrad, Cockpit, Sitze (inklusive Rückbank), Scheiben und Elektronikbauteile (ECUs, Kabelbaum, Starterbatterie) auf Einzelteilebene analysiert und deren Werkstoff und Masse erfasst.

Ausgehend von den Ergebnissen der Werkstoffbilanz wurde für die Abschätzung des Produktionsaufwandes der Fahrzeugkomponenten eine Recherche für die Produktionsdaten (Energiebedarf und Treibhausgasemissionen) durchgeführt. Diese Daten wurden aus bestehender Literatur, Statistiken, Umweltbilanzen und öffentlichen Datenbanken entnommen (siehe Kapitel 6). Die Ergebnisse der Massebilanz und die erarbeiteten Produktionsdaten wurden in einer Datenbank zusammengeführt und stellen die Grundlage für die spätere Bewertung möglicher Lenkungseffekte durch die Gesetzgebung dar.

Für die Zusammenführung der Daten aus vorangegangenen Untersuchungen und der Daten, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gewonnen wurden, wurde ein Modulkonzept entwickelt, welches den gesamten Produktionsaufwand eines konfigurierbaren Fahrzeuges zeigt und bei Bedarf in einer Fahrzeugbibliothek ablegt (siehe Kapitel 7).

Um den Einfluss gesetzlicher Lenkungseffekte auf die Produktion festzustellen, wurden zwei mögliche Lenkungseffekte herangezogen.

2 Bedeutung des Treibhausgaseffekts

Veränderungen der Konzentration der Treibhausgase innerhalb der Atmosphäre, natürlicher oder anthropogener Herkunft, verursachen eine Änderung des atmosphärischen Strahlungshaushalts. Die Treibhausgase absorbieren die langwellige, energiereiche Strahlung der Sonne, wandeln diese in thermische Energie um und tragen somit zur stärkeren Erwärmung der Atmosphäre bei. Durch diesen Prozess, auch Treibhausgaseffekt genannt, haben Treibhausgase eine globale und langfristige Wirkung auf das Erdklima. Zu den wichtigsten Treibhausgasen gehören folgende Gase:⁸

- Kohlenstoffdioxid (CO₂),
- Methan (CH₄),
- Distickstoffmonoxid (N₂O) und
- Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW).

Jedes dieser Treibhausgase ist im unterschiedlichen Maße klimawirksam. Um die Wirkung der klimarelevanten Gase vergleichen zu können, wird jedem dieser Gase ein Gewichtungsfaktor, welcher sein Wirkpotenzial auf einen bestimmten Zeithorizont (zum Beispiel 100 Jahre) zeigt, zugeordnet. Dieser Gewichtungsfaktor wird auch „Global Warming Potential“ (GWP) genannt. Als Referenz für die Umrechnung in Gewichtungsfaktoren dient CO₂. Mit diesen Gewichtungsfaktoren werden die Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalente umgerechnet und können für spätere Bewertungen der gesamten Treibhausgasemissionen aufsummiert werden.⁹ In Tabelle 1 sind die GWP₁₀₀-Werte für verschiedene Treibhausgase aufgelistet.

Treibhausgas	GWP ₁₀₀ [kgCO ₂ eq/kgTreibhausgas]
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	310
CF ₄	5820
SF ₆	22450

Tabelle 1: GWP₁₀₀ einiger klimarelevanter Gase.¹⁰

Abbildung 2 zeigt, dass CO₂ mit 81 % der klimarelevanten Gase als Hauptbestandteil des anthropogenen Treibhausgaseffekts gilt.

⁸ Vgl. (Kaltschmitt, 2015), S. 22ff.

⁹ Vgl. (Wansart, 2012), S. 8f.

¹⁰ Vgl. (Klöpffer & Grahl, 2014), S. 256.

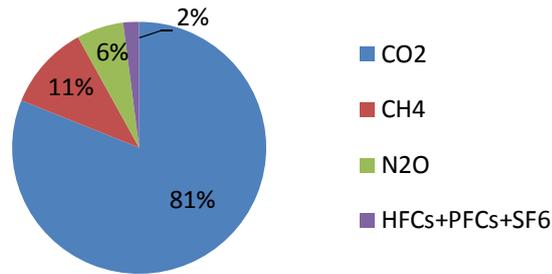


Abbildung 2: Anteile klimarelevanter Gase an den Treibhausgasemissionen 2012.¹¹

2.1.1 Betrachtung der Treibhausgase im Verkehrssektor

Der bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen entstehende Ausstoß an CH₄ und N₂O ist gegenüber CO₂ vergleichsweise gering und macht trotz höherem GWP nur ca. 1 % des Treibhausgaspotenzials des Abgases aus.¹²

Im Folgenden werden aufgrund des überwiegenden Anteils der CO₂-Emissionen am Treibhausgaseffekt die CO₂-Emissionen in globaler-, EU- und österreichweiter Sichtweise betrachtet.

2.1.2 Bedeutung des Verkehrssektors für die globalen CO₂-Emissionen

Im Jahr 2013 wurden weltweit 32189,7 Mio. Tonnen CO₂ emittiert. Aus globaler Sicht steht der Elektrizitäts- und Wärmeproduktionssektor an erster Stelle (42 %), gefolgt vom Transportsektor (23 %). Innerhalb des Verkehrssektors dominiert mit 17 % der Straßenverkehr.¹³ Die Verteilung der globalen CO₂-Emissionen sind in Abbildung 3 dargestellt.

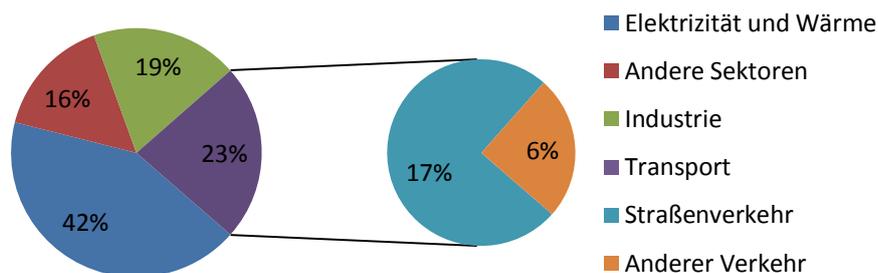


Abbildung 3: Globale CO₂-Emissionen 2013 nach Sektoren.¹⁴

¹¹ Eigene Darstellung in Anlehnung an: (UNFCCC, 2014), S. 10.

¹² Vgl. (Gruden, 2008), S. 22 und 351.

¹³ Vgl. (International Energy Agency, 2015), S. 66.

¹⁴ Eigene Darstellung in Anlehnung an: (International Energy Agency, 2015), S. 66.

2.1.3 Situation der CO₂-Emissionen in der Europäischen Union

In der Europäischen Union betragen die CO₂-Emissionen im Jahr 2013 3340,1 Mio. Tonnen. Davon sind 25 % dem Straßenverkehr zuzuordnen. Laut RWTH Aachen stammen 60 % der Straßenverkehrsemissionen aus PKW- und sonstigem Personenverkehr.¹⁵ Die CO₂-Emissionen in der Europäischen Union sind in Abbildung 4 dargestellt.

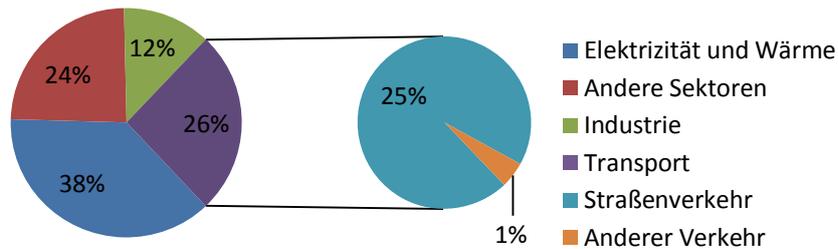


Abbildung 4: CO₂-Emissionen 2013 in der EU nach Sektoren.¹⁶

2.1.4 Situation der CO₂-Emissionen in Österreich

In Österreich betragen 2013 die CO₂-Emissionen 65,1 Mio. Tonnen (rund 2 % der EU-Emissionen). Der Straßenverkehr ist mit 34 % an den österreichweiten CO₂-Emissionen beteiligt. Abbildung 5 zeigt die CO₂-Emissionen in Österreich für das Jahr 2013.

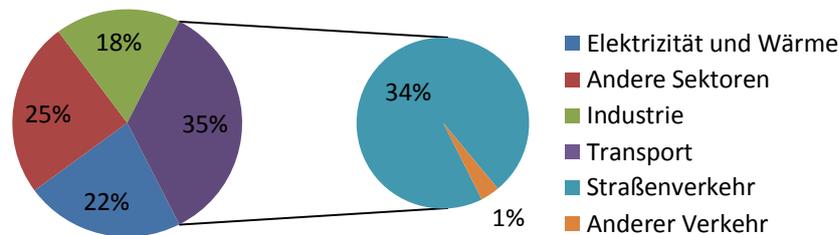


Abbildung 5: CO₂-Emissionen 2013 in Österreich nach Sektoren.¹⁷

¹⁵ Vgl. (RWTH Aachen, 2012), S. 11.

¹⁶ Eigene Darstellung in Anlehnung an: (International Energy Agency, 2015), S. 66.

¹⁷ Ebenda.

3 Aktuelle gesetzliche Rahmenbedingungen zur Ermittlung der CO₂-Flottenemissionen und Entwicklung in naher Zukunft

Die gesetzliche Limitierung von Abgasemissionen fand ihren Anfang in den 1970er Jahren in Europa und den USA mit den Air Quality Standards. Mit diesen Standards wurden gesetzliche Rahmenbedingungen geschaffen, um Emissionen durch Verkehr und Industrie zu reduzieren. Zunächst wurden die Abgaskomponenten Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickstoffoxide (NO_x) und die Partikel-Emissionen reguliert.¹⁸ Wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben wurde, sind in der Europäischen Union 25 % der CO₂-Emissionen durch den Straßenverkehr bedingt. Vor diesem Hintergrund wurden zusätzliche, gesetzliche Maßnahmen getroffen, um die CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen zu reduzieren. In Abbildung 6 sind die historischen CO₂-Flottenemissionen, die aktuellen und zukünftigen Zielvorgaben für die spezifischen CO₂-Emissionen in Europa, den USA und Japan zu sehen. Im folgenden Abschnitt wird näher auf die aktuelle und zukünftige Gesetzgebung besonders in Europa sowie in den USA und Japan eingegangen.

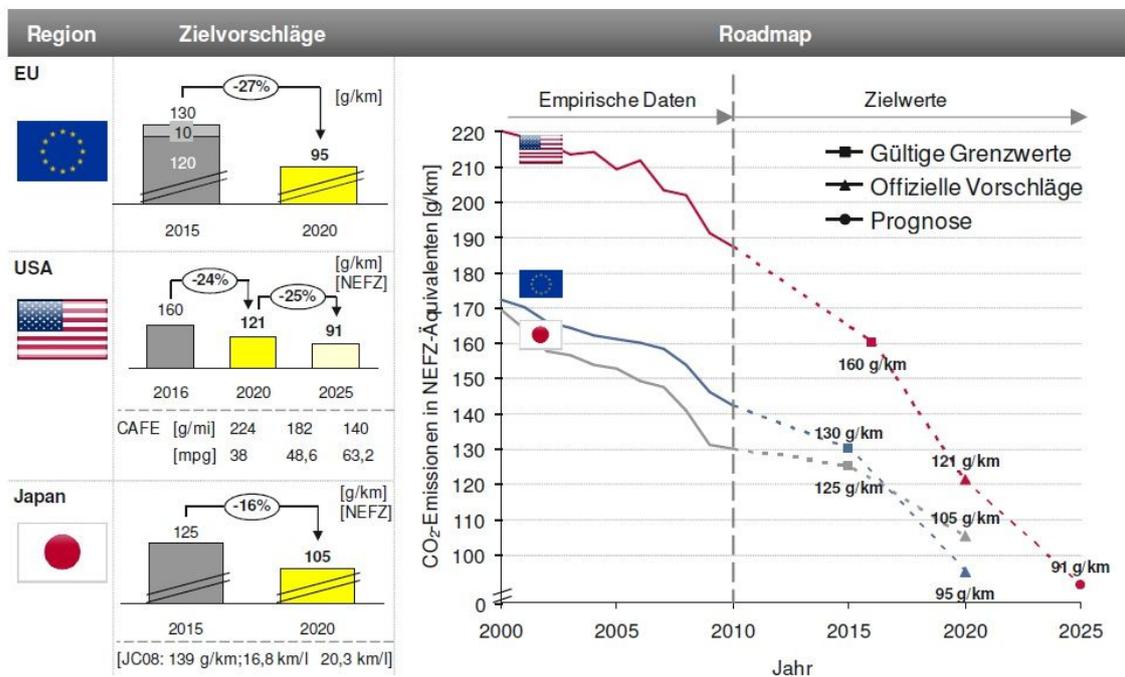


Abbildung 6: Zielvorgaben und Entwicklung der CO₂-Flottenemissionen.¹⁹

¹⁸ Vgl. (Gruden, 2008), S. 11f.; vgl. <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/index.htm>; Zugriffsdatum 25.12.2015.

¹⁹ (RWTH Aachen, 2012), S. 25.

3.1 Aktuelle Gesetzgebung in der EU

Mit der EU-Verordnung EG Nr.443/2009 gelten seit 2012 neue Grenzwerte für die spezifischen CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen. Das Konzept gibt ein Gemeinschaftsziel von durchschnittlich 130 gCO₂/km vor. Ab 2020 wurde ein Zielwert der durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Neuwagenflotte auf 95 gCO₂/km festgelegt.²⁰

Die Hersteller sollen selbst entscheiden können, mit welchen technischen Lösungen sie die CO₂-Zielvorgaben nach der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 erfüllen. Die durchschnittlichen spezifischen Emissionen aller zugelassenen Neuwagen müssen die Zielvorgaben unterschreiten. Den Herstellern ist es erlaubt, sich für maximal fünf Jahre mit anderen Herstellern in Emissionsgemeinschaften zusammenzuschließen. Die durchschnittlichen Emissionen der Emissionsgemeinschaft dürfen die gültigen spezifischen durchschnittlichen Emissionsziele nicht überschreiten.²¹

3.1.1 Überwachung und Meldung der Emissionen

Die Mitgliedsstaaten der EU erfassen jeweils für das folgende Kalenderjahr die Angaben über zugelassene Neuwagen in ihrem Hoheitsgebiet. Folgende Angaben sind zu erfassen: Hersteller; Typ, Variante und Version; spezifische CO₂-Emissionen (gCO₂/km); Masse (kg); Radstand (mm) und Spurweite. Nach der Verordnung (EG) 715/2007 werden die spezifischen CO₂-Emissionen in der Europäischen Union mit einem standardisierten Verfahren (Typenzulassung) gemessen. Die Messung der spezifischen CO₂-Emissionen führen zertifizierte EG-Prüflabore auf Rollenprüfständen durch. Auf Basis der Messwerte und Zielvorgaben der spezifischen CO₂-Emissionen wird dem Hersteller mitgeteilt, ob er die Vorgaben über- oder unterschritten hat.²² Der standardisierte Prüfzyklus ist in Kapitel 3.1.7 näher erklärt.

3.1.2 Zielvorgaben für die spezifischen CO₂-Emissionen

Jeder Hersteller muss sicherstellen, dass die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen die Zielvorgabe des jeweiligen Jahres nicht überschreiten.²³ Die Berechnung der Zielvorgabe für die spezifischen CO₂-Emissionen der Hersteller ist von der durchschnittlichen Masse der Neufahrzeugflotte abhängig und erfolgt nach den in Tabelle 2 aufgelisteten Formeln.

²⁰ Vgl. (Europäische Union, 2009), S. 2.

²¹ Ebenda, S. 2f.

²² Vgl. (Umweltbundesamt, 2014), S. 13; vgl. (Europäische Union, 2009), S. 7.

²³ Vgl. (Europäische Union, 2009), S. 5f.

Aktuelle gesetzliche Rahmenbedingungen zur Ermittlung der CO₂-Flottenemissionen
und Entwicklung in naher Zukunft

Zeitraum	spezifische CO ₂ -Emissionen	M_0 [kg]	a
2012–2015	$130 + a \cdot (M - M_0)$	1372,0	0,0457
2016–2019	$130 + a \cdot (M - M_0)$	1392,4	0,0457
ab 2020	$95 + a \cdot (M - M_0)$	²⁴	0,0333

Tabelle 2: Berechnung der spezifischen CO₂-Emissionen.

Mit:

M [kg]: Masse des Kraftfahrzeugs

M_0 [kg]: Referenzmasse

a Massenzuschlagsfaktor

3.1.3 Übergangsphase „Phase in“

Für das Erreichen der jeweiligen Zielwerte wurde eine Übergangsphase („Phase in“) vorgesehen. In diesem Zeitraum muss nur ein Teil der zugelassenen Neu-PKW die jeweiligen Zielwerte einhalten.²⁵ In Tabelle 3 sind die Werte für die „Phase in“-Phase angegeben. So müssen beispielsweise im Jahr 2012 65 % der zugelassenen Neu-PKW eines Herstellers den Zielwert von 120 gCO₂/km einhalten. Im Jahr 2020 müssen 95 % der zugelassenen Neufahrzeuge den Zielwert von 95 g/km erreichen.

2012	2013	2014	2015–2019	2020	ab Ende 2020
65 %	75 %	80 %	100 %	95 %	100 %

Tabelle 3: Übergangsphase „Phase in“.²⁶

3.1.4 Begünstigungen

Begünstigungen für Hersteller gibt es für neue PKW mit spezifischen CO₂-Emissionen von weniger als 50 gCO₂/km. Jeder Neu-PKW mit einem ermittelten CO₂-Ausstoß von weniger als 50 gCO₂/km zählt bei der Berechnung der spezifischen CO₂-Flottenemissionen mit den in Tabelle 4 angegebenen Faktoren abhängig vom Jahr unter Umständen mehrfach.²⁷

²⁴ Nach Artikel 13(2) festgelegter Wert (durchschnittliche Fahrzeugmasse der Flottenfahrzeuge aus den vorherigen drei Jahren)

²⁵ Vgl. (Europäische Union, 2009), S. 5f.

²⁶ Vgl. (Europäische Union, 2014a), S. 18.

²⁷ Vgl. (Europäische Union, 2009), S. 6.

Aktuelle gesetzliche Rahmenbedingungen zur Ermittlung der CO₂-Flottenemissionen
und Entwicklung in naher Zukunft

2012	2013	2014	2015	ab 2016	2020	2021	2022	ab 2023
3,5 PKW	3,5 PKW	2,5 PKW	1,5 PKW	1 PKW	2 PKW	1,67 PKW	1,33 PKW	1 PKW

Tabelle 4: Begünstigungen für die Hersteller.²⁸

3.1.5 Abgabe für Emissionsüberschreitungen

Sind die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen eines Herstellers im jeweiligen Jahr höher als seine Zielvorgabe, so sind der Europäischen Kommission Abgaben für die Überschreitung (siehe Tabelle 5) zu entrichten.²⁹

	Überschreitung	Formeln zur Berechnung der Abgaben
2012– 2018	$x > 3 \text{ gCO}_2/\text{km}$	$\left(\left(x - 3 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}} \right) \cdot \frac{95 \frac{\text{EUR}}{\text{gCO}_2}}{\text{km}} + 45 \text{EUR} \right) \cdot n_{\text{neuPKW}}$
	$3 \text{ gCO}_2/\text{km} > x > 2 \text{ gCO}_2/\text{km}$	$\left(\left(x - 2 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}} \right) \cdot \frac{25 \frac{\text{EUR}}{\text{gCO}_2}}{\text{km}} + 20 \text{EUR} \right) \cdot n_{\text{neuPKW}}$
	$2 \text{ gCO}_2/\text{km} > x > 1 \text{ gCO}_2/\text{km}$	$\left(\left(x - 1 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}} \right) \cdot \frac{15 \frac{\text{EUR}}{\text{gCO}_2}}{\text{km}} + 5 \text{EUR} \right) \cdot n_{\text{neuPKW}}$
	$x < 1 \text{ gCO}_2/\text{km}$	$\left(x \cdot \frac{5 \frac{\text{EUR}}{\text{gCO}_2}}{\text{km}} \right) \cdot n_{\text{neuPKW}}$
ab 2019	Unabhängig von der Überschreitungshöhe	$\left(x \cdot \frac{95 \frac{\text{EUR}}{\text{gCO}_2}}{\text{km}} \right) \cdot n_{\text{neuPKW}}$

Tabelle 5: Berechnungsschema der Abgaben bei Überschreitung der spezifischen CO₂-Emissionen.³⁰

²⁸ Vgl. (Europäische Union, 2009), S. 6; Vgl. (Europäische Union, 2014a), S. 18.

²⁹ Vgl. (Europäische Union, 2009), S. 7.

³⁰ In Anlehnung an (Europäische Union, 2009), S. 7f; Vgl. (RWTH Aachen, 2012), S. 15.

Mit:

x Höhe der Überschreitung in [gCO₂/km]

n_{neuPKW} Anzahl der neu zugelassenen PKW

Im Jahr 2013 haben laut Amtsblatt der Europäischen Union zwei Hersteller die Zielvorgaben überschritten, 2014 ein Hersteller.³¹

3.1.6 Ausnahmen

Für unabhängige Hersteller mit kleinen Stückzahlen (weniger als 10.000 Fahrzeuge/Jahr) gelten alternative Emissionsziele. Für Nischenhersteller (10.000–300.000 Fahrzeuge/Jahr) gibt es ebenfalls eine alternative Zielvorgabe, die 25 % unter ihren durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen im Jahr 2007 liegt.³²

3.1.7 Prüfzyklus

Die Richtlinie ECE-R101 legt die Messung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs bei der Typzulassung fest. Definierte Randbedingungen und genormte Fahrzyklen sind Grundlage für diese Messung, die am Rollenprüfstand stattfindet. In Europa wird hierfür der „Neue Europäische Fahrzyklus“ verwendet. Zukünftig soll jedoch das „Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure“ Nachfolger des NEFZ werden.³³

3.1.7.1 Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)

Der NEFZ oder NEDC setzt sich aus zwei Teilabschnitten zusammen: Der erste Abschnitt ist ein Stadtzyklus und der darauf folgende ein außerstädtischer Zyklus. In Abbildung 7 ist die Zusammensetzung und der Verlauf des NEFZ dargestellt.³⁴

³¹ Vgl. (Europäische Union, 2014b), S. 31; vgl. (Europäische Union, 2015), S. 53.

³² Vgl. (Europäische Union, 2009), S. 3.

³³ Vgl. (RWTH Aachen, 2012), S. 20; vgl. (Mock, Tietge, et al., 2014), S. 1.

³⁴ Vgl. (Schmidt, 2015), S. 607.

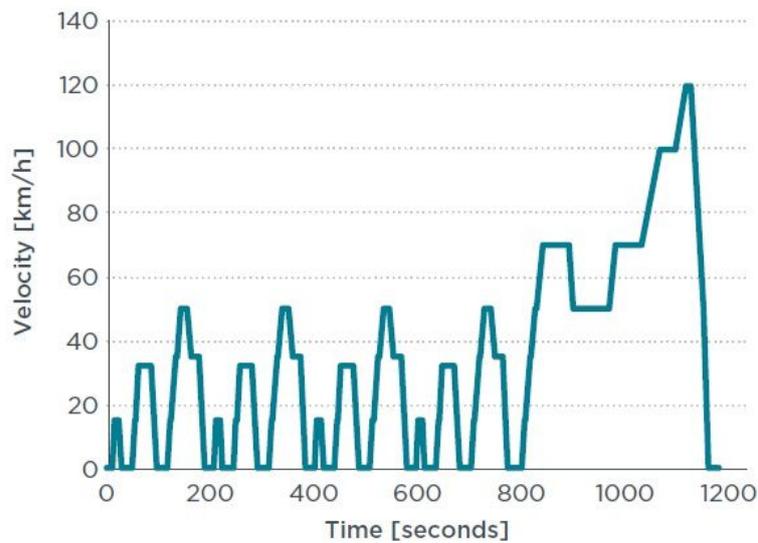


Abbildung 7: Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ).³⁵

Vor dem Start des Prüfzyklus muss das Fahrzeug konditioniert werden. Der Prüfzyklus beginnt anschließend mit einem Kaltstart und dem Stadtzyklus. Der Stadtzyklus hat eine Dauer von 780 Sekunden und bildet innerstädtische Fahrten mit niedriger Last und hohem Leerlaufanteil ab. Der außerstädtische Zyklus dauert 400 Sekunden und erreicht mit 120 km/h die Höchstgeschwindigkeit im gesamten Zyklus. Die gemessenen Kraftstoffverbräuche der Teilabschnitte werden addiert und ausgewertet.³⁶

Der NEFZ bildet aufgrund seines synthetischen Verlaufs nicht alle realen im Verkehr auftretenden Bedingungen ab. Er gerät infolgedessen vermehrt in Kritik. Deshalb gründete die UNECE³⁷ im Jahr 2007 eine Arbeitsgruppe, um ein weltweit harmonisiertes Prüfverfahren für bestimmte Abgasemissionen und den Energieverbrauch für PKW und leichte Nutzfahrzeuge zu entwickeln. Dieser Testzyklus wird „Worldwide Harmonized Light-Duty Test Procedure“ (WLTP) genannt und wird am Ende des Kapitels näher beschrieben.³⁸

3.2 Aktuelle Gesetzgebung in den USA

Seit 1975 werden in den USA die CO₂-Emissionen im Straßenverkehr durch den „CAFE“³⁹-Standard reglementiert. Dieser bezieht sich lediglich auf die Kraftstoffeffizienz von Fahrzeugen. Durch das „California Air Resources Board“, wurde 2007 erstmals ein Gesetz in Kraft gesetzt, welches die Treibhausgasemissionen von Fahrzeugen festlegt.

³⁵ (Mock, Kühlwein, et al., 2014), S. 6.

³⁶ Vgl. (Schmidt, 2015), S. 607; vgl. (RWTH Aachen, 2012), S. 21.

³⁷ United Nations Economic Commission for Europe

³⁸ Vgl. (Schmidt, 2015), S. 608; vgl. (RWTH Aachen, 2012), S. 21.

³⁹ Corporate Average Fuel Economy

Zurzeit bestehen in den USA für die Kraftstoffeffizienz einerseits und die Treibhausgasemissionen von PKW andererseits zwei parallel geltende, abgestimmte Gesetzgebungen. Während die „National Highway Traffic and Safety Administration“ die Kraftstoffeffizienz durch die „CAFE“-Standards reguliert, regelt die „Environmental Protection Agency“ die Treibhausgasemissionen. Im Gegensatz zu Europa basieren die Grenzwerte in beiden Regulierungen auf der Aufstandsfläche der Fahrzeuge. Bei Überschreitung der Grenzwerte droht in den USA, anstelle von Strafabgaben, der Entzug des Verkaufszertifikats.⁴⁰

Die CO₂-Emissionen werden in den USA mit dem FTP-Zyklus im innerstädtischen und dem HFET-Zyklus im außerstädtischen Bereich ermittelt. Der FTP-Zyklus ist 17,77 km lang und die Fahrzeit beträgt 1848 Sekunden. Der Zyklus wird in die drei Phasen Kaltstart-, Übergangs- und Warmstartphase unterteilt. Die maximale Geschwindigkeit im FTP beträgt 91,2 km/h. Der HFET-Zyklus ist 16,5 km lang und die Fahrzeit beträgt ca. 765 Sekunden. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 96,4km/h. Die beiden Zyklen werden in einem Verhältnis von 55:45 kombiniert. In Abbildung 8 ist links der Geschwindigkeitsverlauf des FTP und rechts der des HFET dargestellt.⁴¹

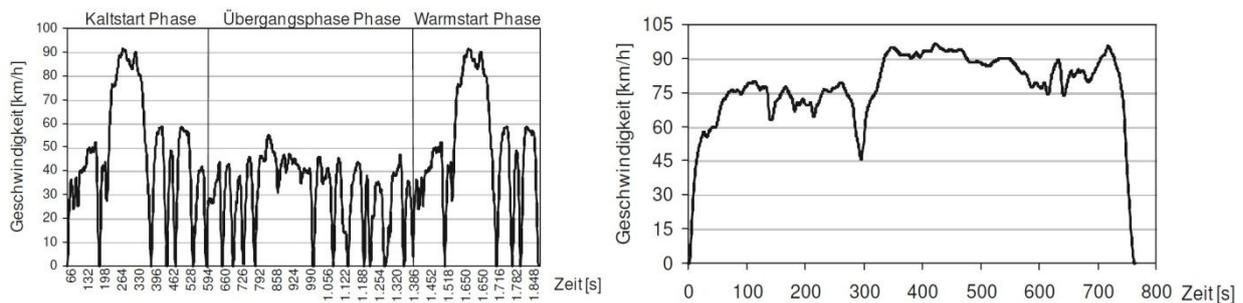


Abbildung 8: Links: innerstädtisch FTP; rechts: außerstädtischer HFET.⁴²

3.3 Aktuelle Gesetzgebung in Japan

In Japan werden seit 2005 die CO₂-Emissionen indirekt über die Kraftstoffeffizienz reglementiert. Im Jahr 2007 wurde eine neue Richtlinie eingeführt, welche den zu erreichenden Fahrzeugflottendurchschnitt ab 2015 regelt. Die Fahrzeuge eines Herstellers werden dabei in Gewichtskategorien eingeteilt. Die durchschnittlichen Flottenwerte eines Herstellers müssen in der jeweiligen Gewichtskategorie die

⁴⁰ Vgl. (RWTH Aachen, 2012), S. 16ff; vgl. (Continental, 2014), S. 27ff.

⁴¹ Vgl. (RWTH Aachen, 2012), S. 21.

⁴² (RWTH Aachen, 2012), S. 21f.

Grenzwerte einhalten.⁴³ In Abbildung 9 sind die Gewichtskategorien für die Grenzwerte in Japan dargestellt.

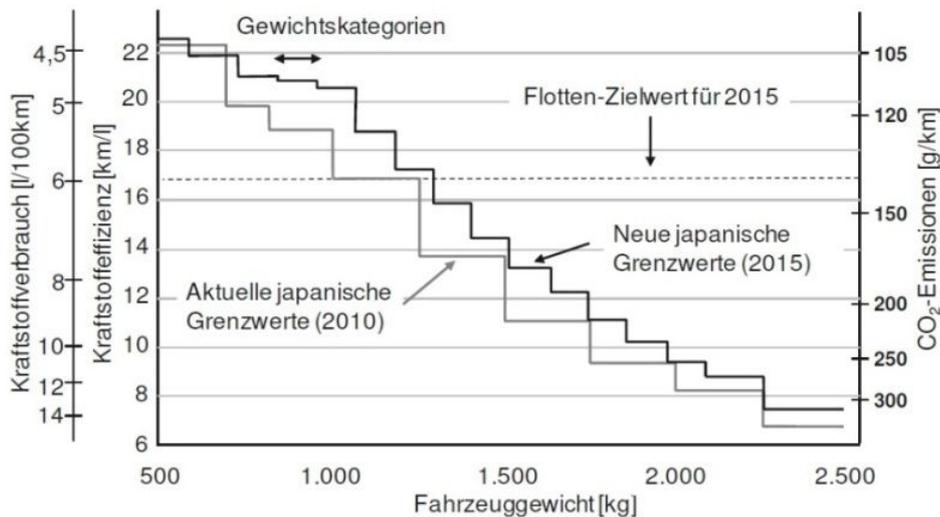


Abbildung 9: Gewichtskategorien für die Grenzwerte in Japan.⁴⁴

Die Emissionen und die Kraftstoffeffizienz werden in Japan mit dem JC08-Fahrzyklus gemessen. Der JC08 ist nach einem „Phase-in“ seit Oktober 2011 vollständig in Kraft getreten. Die Messung findet jeweils im Kalt- und Warmstart statt und wird mit einem Verhältnis von 1:3 kombiniert. Das Geschwindigkeitsprofil des JC08 beschreibt eine Fahrt im überfüllten Stadtverkehr mit Leerlauf-, Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen. Während der Fahrt werden 8,2 km zurückgelegt, die Dauer beträgt 1200 Sekunden mit einer maximalen Geschwindigkeit von 81,6 km/h. In Abbildung 10 ist das Geschwindigkeitsprofil des JC08 abgebildet.⁴⁵

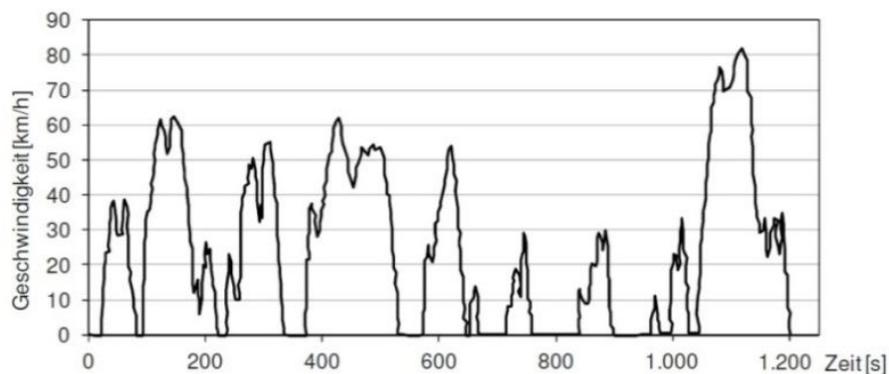


Abbildung 10: Japanischer JC08-Zyklus.⁴⁶

⁴³ Vgl. (RWTH Aachen, 2012), S. 18f.

⁴⁴ (RWTH Aachen, 2012), S. 19.

⁴⁵ Vgl. (RWTH Aachen, 2012), S. 18ff.

⁴⁶ (RWTH Aachen, 2012), S. 22.

3.4 Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP)

Bei der Entwicklung des WLTP lag der Fokus auf der Erstellung eines robusten Messverfahrens, das realitätsnahe und zugleich reproduzierbare Ergebnisse liefert. Der Worldwide Harmonized Light-Vehicles Test Cycle (WLTC), der Testzyklus des WLTP, ist ein transienter Fahrzyklus und basiert auf real erhobenen Fahrdaten. Durch den WLTP werden weltweit, falls von teilnehmenden Ländern akzeptiert, einheitliche Rahmenbedingungen geschaffen, um den Normverbrauch, die CO₂- und Schadstoffemissionen zu messen.⁴⁷ In Abbildung 11 ist der Geschwindigkeitsverlauf des WLTC ersichtlich.

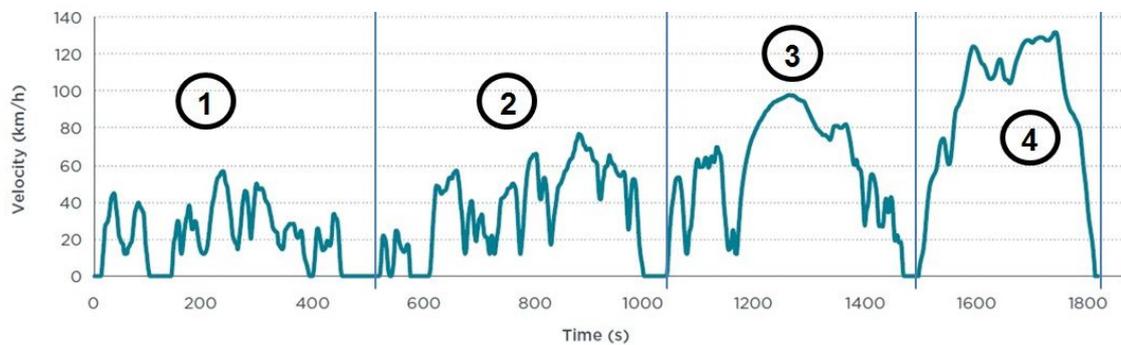


Abbildung 11: Fahrzyklus des WLTP.⁴⁸

Der WLTC setzt sich aus 4 verschiedenen Abschnitten zusammen:

1. Kaltstart- und „Low-Speed“-Phase (589 Sekunden),
2. „Medium-Speed“-Phase (433 Sekunden),
3. „High-Speed“-Phase (455 Sekunden) und die
4. „Extra-High-Speed“-Phase (323 Sekunden).

In Tabelle 6 sind die grundlegenden Unterschiede zwischen NEFZ und WLTC erläutert:

⁴⁷ Vgl. (Schmidt, 2015), S. 608.

⁴⁸ Erweiterte Abbildung; (Mock, Kühlwein, et al., 2014), S. 6.

	NEDC	WLTC
Startkonditionen	20–30 °C	14 °C/23 °C
Dauer	1180 s	1800 s
Fahrstrecke	11,03 km	23,27 km
Maximalgeschwindigkeit	120 km/h	131,3 km/h
Durchschnittsgeschwindigkeit	33,6 km/h	46,5 km/h
Leerlaufanteil	23,7 %	12,6 %
Stopphasen	14	9

Tabelle 6: Unterschiede NEFZ-WLTC.⁴⁹

3.4.1 Auswirkungen des WLTP auf die Gesetzgebung

Nach Mock gibt es drei Elemente, welche die Umrechnungsfaktoren von NEFZ auf WLTP beeinflussen:⁵⁰

- ein längerer und dynamischerer Testzyklus mit flexibler Schaltstrategie,
- eine höhere Fahrzeugtestmasse und
- eine niedrigere Motortemperatur bei Teststart.

Wie sich diese drei Elemente möglicherweise auf die Gesetzgebung auswirken, gibt Mock, unter Annahme einer durchschnittlichen Fahrzeugflotte für 2020, wie folgt an (siehe Abbildung 12):

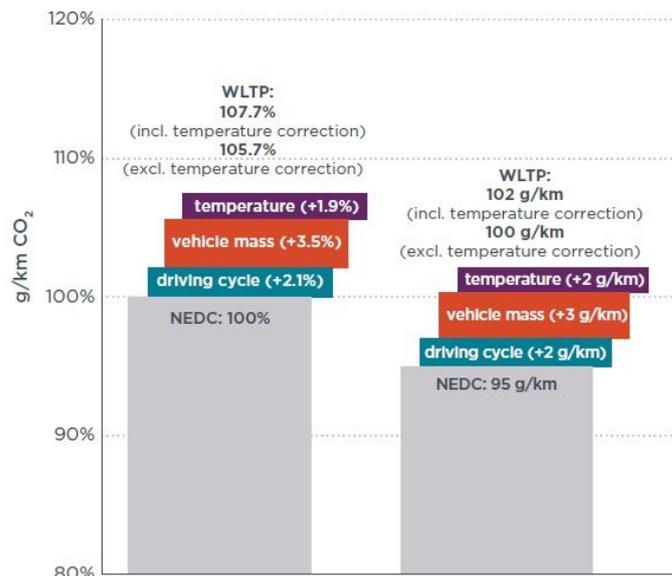


Abbildung 12: Auswirkung des WLTP auf die Gesetzgebung.⁵¹

⁴⁹ Vgl. Schmidt (2015), S. 609; vgl. Mock et. al. (2014b), S. 7.

⁵⁰ Vgl. (Mock, Kühlwein, et al., 2014), S. 6.

Nach diesen Annahmen müsste der Grenzwert für CO₂-Flottenemissionen bei Anwendung des WLTP in der EU bei 102 g/km und somit um 7 g/km über dem derzeitig festgelegten NEFZ-Grenzwert von 2020 liegen, um Unterschiede und Einflüsse des realitätsnäheren Prüfverfahrens zu berücksichtigen.

3.4.2 Einführung des WLTP in der EU

Zwischen 2017 und 2020 wird in Europa der WLTP parallel zum NEFZ geführt. In dieser Zeit sollen Hersteller und Regulierungsbehörden Erfahrungswerte im Umgang mit dem WLTP sammeln. Ab 2020 soll nur noch der WLTP mit den neuen Grenzwerten gelten. In der EU ist dabei ein Jahr als „Phase in“ vorgesehen.⁵² Abbildung 13 zeigt die geplanten Einführungsphasen für den WLTP.

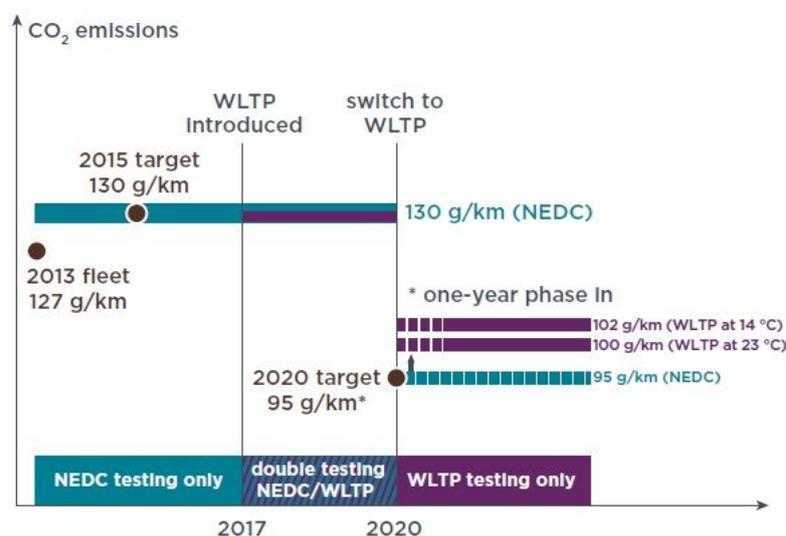


Abbildung 13: Timeline für die Einführung des WLTP.⁵³

3.5 Real Driving Emissions

Die Messung der Abgasemissionen erfolgt auch im WLTP durch einen festgelegten Fahrzeugzyklus unter definierten Umgebungsbedingungen. In Europa wird darüber hinaus diskutiert, wie die Abgasemissionen von Fahrzeugen im realen Straßenverkehr, die sogenannten „Real Driving Emissions“ (RDE), gemessen werden können. Eine Möglichkeit, um die realen Emissionen während einer Fahrt im Straßenverkehr zu messen, sind mobile Messsysteme, wie das „Portable Emission Measurement System“

⁵¹ (Mock, Kühlwein, et al., 2014), S. 9.

⁵² Vgl. (Mock, Kühlwein, et al., 2014), S. 17f.

⁵³ (Mock, Kühlwein, et al., 2014), S. 18.

(PEMS)⁵⁴. Das Ergebnis der RDE wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst. Um dennoch vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, werden Festlegungen für die Rahmenbedingungen der Messfahrt und die Auswahl der Strecke getroffen.⁵⁵

Über diese Entwicklung hinaus werden in dieser Arbeit zukünftige, mittelfristige Möglichkeiten für die Gesetzgebung untersucht, um die Treibhausgasemissionen in der Herstellungsphase von Kraftfahrzeuge zu reglementieren. Um eine Abschätzung des Produktionsaufwandes von Fahrzeugkomponenten geben zu können, wurde auf Werte aus Datenbanken und auf bestehende Studien, die nach der Methode der Ökobilanzierung erstellt worden sind, zurückgegriffen. Anschließend wird ein Überblick über die Geschichte und den Aufbau einer Ökobilanz gegeben.

⁵⁴Vgl. www.avl.com/-/avl-m-o-v-e-gas-pems-is; Zugriffsdatum 29.4.2016

⁵⁵ Vgl. (Schmidt, 2015), S. 611f.

4 Life Cycle Assessment (LCA) – Ökobilanz

Die zunehmende Bedeutung des Umweltschutzes, das steigende Bewusstsein für diesen und die dadurch entstehenden Auswirkungen die in Zusammenhang mit der Produktion und der Nutzung von Produkten stehen, führte zur Entwicklung von Methoden, um die Einflüsse auf diese Auswirkungen besser verstehen zu können. Eine für diesen Zweck entwickelte Methode ist die Ökobilanz⁵⁶. Nach ISO 14040 ist unter dem Begriff Ökobilanz die *„Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“* zu verstehen.⁵⁷

Die Ökobilanz bezieht sich auf potentielle Umweltwirkungen und Umweltaspekte entlang des Lebensweges des Produktes. Dies beginnt bei der Rohstoffgewinnung und erstreckt sich über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung und Recycling bis hin zur finalen Verwertung. In Fachkreisen wird dies auch als „cradle-to-grave“ bezeichnet.⁵⁸

Die Ökobilanz kann dabei in folgenden Bereichen hilfreich sein:⁵⁹

- Um in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus mögliche Umwelteigenschaften von Produkten festzustellen und diese zu verbessern.
- Als Informationsquelle für Industrie, Regierungs- und Nichtregierungsorganisationen.
- Zum Selektieren relevanter Indikatoren der Umwelteigenschaften und der entsprechenden Messverfahren.
- Im Bereich Marketing (Umweltdeklarationen, Umweltkennzeichen).

Im Folgenden wird auf die Geschichte bzw. die Anfänge der Ökobilanz eingegangen. Anschließend werden die wichtigsten Grundlagen, welche für die vorliegende Arbeit von Belang sind, beschrieben. Für detaillierte Informationen zum Thema Ökobilanz wird auf einschlägige Fachliteratur verwiesen.⁶⁰

4.1 Geschichte des Life Cycle Assessment

Die Ökobilanz als Werkzeug im modernen Sinn ist seit ca. 45 Jahren in Gebrauch. In der Literatur gibt es jedoch ältere Ansätze, die bis in die 1880er Jahre zurückreichen.

⁵⁶ Engl. Life Cycle Assessment (LCA).

⁵⁷ Vgl. (Österreichisches Normungsinstitut, 2009), S. 4ff.

⁵⁸ (Österreichisches Normungsinstitut, 2006), S. 5. vgl. (Klöpffer & Grahl, 2014), S. 1.

⁵⁹ Vgl. (Österreichisches Normungsinstitut, 2009), S. 4.

⁶⁰ (Klöpffer & Grahl, 2014); (Österreichisches Normungsinstitut, 2009); (Österreichisches Normungsinstitut, 2006).

Der schottische Wirtschaftswissenschaftler Patrick Geddes entwickelte in dieser Zeit einen Vorgänger, der dem heutigen „Life Cycle Inventory“⁶¹ nahe kommt. Geddes legte den Blickpunkt dabei besonders auf die Energieversorgung, insbesondere jener mit Kohle. Unter der Führung des Midwest Research Institute⁶² wurde 1970 die erste moderne LCA unter dem Namen „Resource and Environmental Profile Analysis“ (REPA) geleitet und publiziert. Dabei wurde eine Analyse über den Ressourcenverbrauch und die Emissionen, die von einem Produktsystem (Definition Produktsystem siehe 4.2) verursacht wurden, erstellt. Im Jahre 1990 organisierte die „Society of Environment Toxicology and Chemistry“ (SETAC) und die „SETAC-Europe“ einen Workshop zum Thema „A Technical Framework for Life Cycle Assessment“ in Smugglers Notch und Leuven. Ziel dieser Workshops war die Weiterentwicklung und Standardisierung der Ökobilanz. In Abbildung 14 ist das SETAC-Dreieck mit den wichtigsten Inhalten einer gesamtheitlichen LCA-Analyse zu sehen. Dieses wurde zwischen 1990 und 1993 entwickelt und war der erste Ansatz, die Ökobilanz zu strukturieren.⁶³

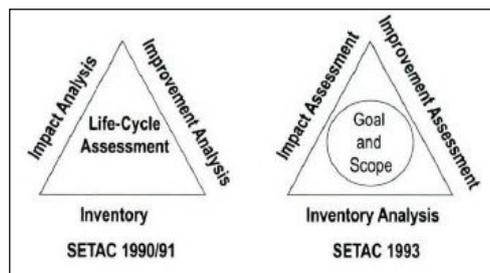


Abbildung 14: Links: SETAC-Dreieck von 1990; rechts: SETAC-Dreieck Erweiterung von 1993.⁶⁴

Die Internationale Organisation für Normung (ISO) hat die wesentliche Struktur, welche von der SETAC entwickelt wurde, übernommen, mit der Ausnahme, dass der Term „Improvement Assessment“ in „Interpretation“ umbenannt wurde. Die LCA-Standards ISO 14040 und ISO 14044 wurden in die ISO 14000-Familie für Umweltmanagement eingegliedert. Die ISO 14040 gibt dabei die Grundstruktur vor und bildet eine Leitlinie für die Erstellung einer LCA. Die ISO 14044 beschreibt die genaue Durchführung einer LCA und geht auf die technischen Anforderungen und Richtlinien ein. In der Zeit zwischen 2001 und 2006 wurden Standards überarbeitet, wesentliche technische Änderungen blieben dabei aber aus.⁶⁵

⁶¹ Auch Sachbilanz

⁶² Kansas City, USA.

⁶³ Vgl. (Klöpffer & Grahl, 2014), S. 6ff.

⁶⁴ (Klöpffer & Grahl, 2014), S. 9.

⁶⁵ Vgl. Klöpffer/Grahl (2014), S. 10ff; vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 11.

4.2 Begriffsdefinitionen nach ISO 14040

Das folgende Kapitel beschreibt einige Begriffe, die für das bessere Verständnis der Arbeit dienen sollen.

Produkt: „jede Ware oder Dienstleistung“⁶⁶

Lebensweg: „aufeinander folgende und miteinander verbundene Stufen eines Produktsystems von der Rohstoffgewinnung oder Rohstoffherzeugung bis zur endgültigen Beseitigung“⁶⁷

Prozessmodul: „kleinster in der Sachbilanz berücksichtigter Bestandteil, für den Input- und Outputdaten quantifiziert werden“⁶⁸

Input: „Produkt-, Stoff- oder Energiefluss, der einem Prozessmodul zugeführt wird“⁶⁹

Output: „Produkt-, Stoff- oder Energiefluss, der einem Prozessmodul abgegeben wird“⁷⁰

Sachbilanz: „Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst“⁷¹

Prozess: „Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt“⁷²

Funktionelle Einheit: „quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit“⁷³

Prozessenergie: „zum Betreiben des Prozesses oder der Einrichtung innerhalb eines Prozessmoduls benötigter Energieinput, mit Ausnahme des Energieinputs für den Energieaufwand für die Bereitstellung dieser Prozessenergie“⁷⁴

Systemgrenzen: „Satz von Kriterien zur Festlegung, welche Prozessmodule Teil eines Produktesystems sind“⁷⁵

Wirkungsabschätzung: „Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges des Produktes dient“⁷⁶

⁶⁶ (Österreichisches Normungsinstitut, 2009), S. 7.

⁶⁷ Ebenda, S. 6.

⁶⁸ Ebenda, S. 10.

⁶⁹ Ebenda, S. 9.

⁷⁰ Ebenda, S. 9.

⁷¹ Ebenda, S. 7.

⁷² Ebenda, S. 8.

⁷³ Ebenda, S. 9.

⁷⁴ Ebenda, S. 9.

⁷⁵ Ebenda, S. 10.

Wirkungskategorie: „Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können“⁷⁷

Koppelprodukt: „eines von zwei oder mehreren Produkten aus demselben Prozessmodul oder Produktsystem“⁷⁸

Abfall: „Substanzen oder Gegenstände, die der Eigentümer für die Beseitigung vorgesehen hat oder die er beseitigen muss“⁷⁹

Produktsystem: „Zusammenstellung von Prozessmodulen mit Elementar- und Produktflüssen, die den Lebensweg eines Produktes modellieren und die eine oder mehrere festgelegte Funktionen erfüllt“⁸⁰

In Abbildung 15 ist die allgemeine Darstellung eines Produktsystems ersichtlich:

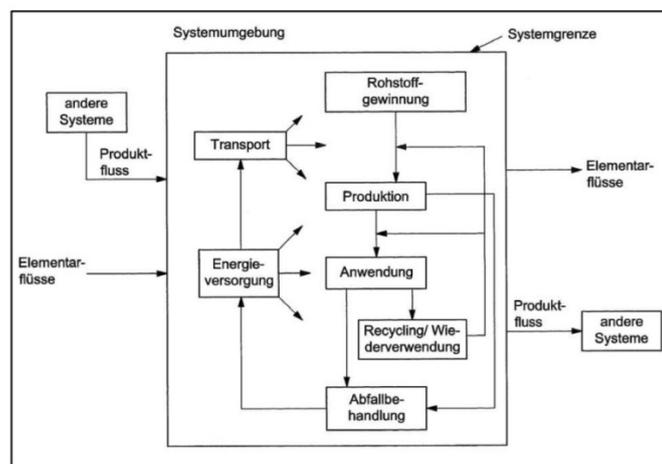


Abbildung 15: Allgemeine Darstellung eines Produktsystems einer Ökobilanz.⁸¹

4.3 Durchführung einer Ökobilanz nach ISO 14044

Grundsätzlich besteht eine Ökobilanz (LCA) aus vier Phasen:⁸²

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens,
- Sachbilanz,
- Wirkungsabschätzung und
- Auswertung.

Diese Phasen sind in Abbildung 16 dargestellt:

⁷⁶ Ebenda, S. 7.

⁷⁷ Ebenda, S. 10.

⁷⁸ Ebenda S. 8.

⁷⁹ Ebenda, S. 10.

⁸⁰ Ebenda, S. 9.

⁸¹ Ebenda, S. 16.

⁸² Ebenda, S. 12.

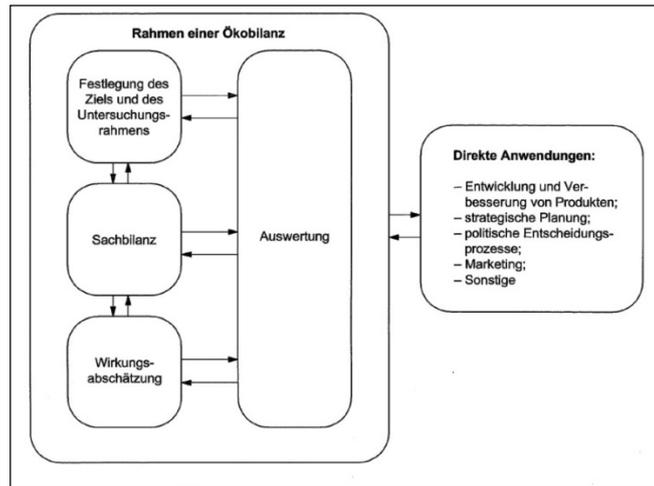


Abbildung 16: Die vier Phasen einer Ökobilanz.⁸³

Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Phasen der Ökobilanz eingegangen.

4.3.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Die eindeutige Festlegung eines Ziels und des Untersuchungsrahmens ist Voraussetzung für die Erstellung einer Ökobilanz. Dabei müssen nach ISO 14044 die beabsichtigten Anwendungsbereiche, die Gründe für die Durchführung der Studie, die Zielgruppe und ob Veröffentlichungen für vergleichende Aussagen geplant sind angegeben werden. Für die Festlegung des Untersuchungsrahmens sind nach ISO 14044 eine klare Definition der gezogenen Systemgrenzen und der getroffenen Annahmen für die Untersuchung von Produktionssystemen erforderlich.⁸⁴ Um Produktsysteme miteinander vergleichen zu können, ist es wichtig, dass die Untersuchungsrahmen der Studie so gelegt sind, dass die Systeme vergleichbar sind. Die Systeme müssen dieselbe funktionelle Einheit besitzen, ebenso sind die Datenqualität, Systemgrenzen und Wirkungsabschätzung diesbezüglich abzustimmen. Sind Unterschiede zwischen den Produktsystemen vorhanden, so müssen diese dokumentiert und angeführt werden.⁸⁵

4.3.2 Sachbilanz

Sind Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz festgelegt, so bilden diese ein Anfangskonzept für die Durchführung der Sachbilanzphase. Die Erstellung einer Sachbilanz ist die zentrale Phase einer Ökobilanz. In dieser Phase werden die Daten der Zu- und Abflüsse über die Systemgrenzen gesammelt und bilanziert. Die Erstellung einer Sachbilanz ist ein iterativer Entstehungsprozess. Bei näherer Analyse des

⁸³ (Österreichisches Normungsinstitut, 2009), S. 13.

⁸⁴ Vgl. (Österreichisches Normungsinstitut, 2006), S. 13.

⁸⁵ Ebenda, S. 17.

betrachteten Systems können neue Erkenntnisse über Sachverhalte zu Änderungen in den Einschränkungen oder Datenanforderungen führen, so dass Ziel und Untersuchungsrahmen der Untersuchung neu angepasst werden müssen.⁸⁶

In Abbildung 17 sind die Schritte für die Erstellung einer Sachbilanz vereinfacht dargestellt. Besondere Bedeutung kommt dabei dem Schritt der Datenerhebung zu.

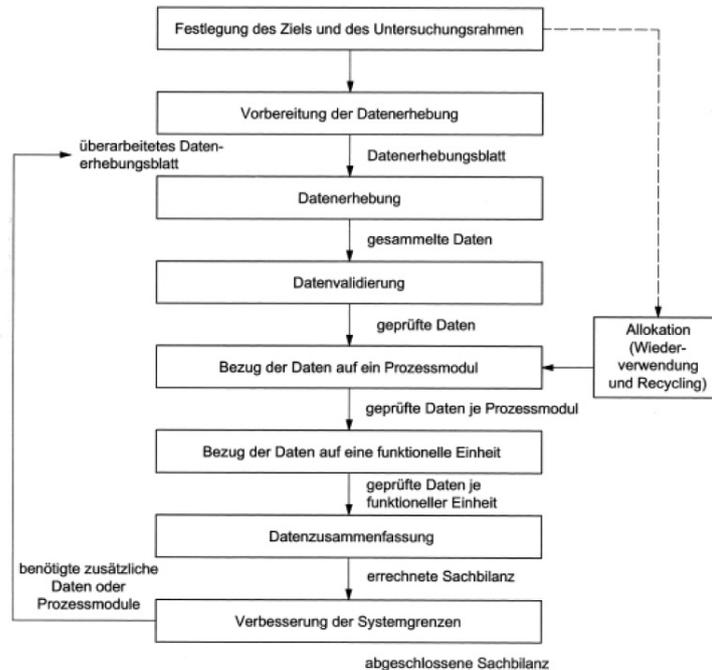


Abbildung 17: Vereinfachter Ablauf der Sachbilanz nach ISO 14044.⁸⁷

4.3.2.1 Datenerhebung

Die Erhebung von Daten hat für jedes Prozessmodul innerhalb definierter Systemgrenzen zu erfolgen. Die Daten können durch Messungen, Berechnungen und Schätzungen ermittelt oder durch Veröffentlichungen erhalten werden. Diese Daten dienen dazu, In- und Outputs der Prozessmodule quantitativ zu bestimmen. Werden Daten von veröffentlichten Quellen herangezogen, ist dies zu dokumentieren und auf diese zu verweisen. Des Weiteren sind alle Berechnungsverfahren zu dokumentieren und Annahmen eindeutig anzugeben.⁸⁸

Die ISO 14044 unterscheidet folgende Datengruppen:⁸⁹

- Energieinputs, Rohstoffinputs, Betriebsstoff-inputs, andere physikalische Inputs,
- Produkte, Koppelprodukte und Abfall,

⁸⁶ Vgl. Ebenda, S. 18.

⁸⁷ Ebenda, S. 19.

⁸⁸ Vgl. Ebenda, S. 18.

⁸⁹ Ebenda, S. 19.

- Emissionen in Luft, Wasser sowie Boden und
- weitere Umweltaspekte.

Nach Feifel /Walk /Wursthorn ist die Erfüllung der Anforderungen an die Datenqualität essenziell für die Datenerhebung der Sachbilanz. Die Daten und die Datenverarbeitung sollten aus akademischer Sicht höchst transparent sein. Die Industrie hingegen stellt Daten oft nur dann zur Verfügung, wenn Konkurrenten und Mitbewerber keine wettbewerbsrelevanten Einblicke in innerbetriebliche Prozesse erhalten. Selbst nach intensivster Recherche in Datenbanken und Literatur ist es möglich, dass Datenlücken vorhanden sind. Nicht nur die Sachbilanzphase kann von den Datenlücken betroffen sein sondern auch die nachfolgenden Phase der Wirkungsabschätzung. Dabei wird auf statistische bzw. öffentlich verfügbare Daten zurückgegriffen.⁹⁰

4.3.3 Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Sachbilanz, mit den erfassten In- und Outputs, liefern die Basis zur Ermittlung der resultierenden Umwelteinflüsse des analysierten Systems. In der Phase der Wirkungsabschätzung werden die Ergebnisse der Sachbilanz mit Indikatoren in verschiedenen Wirkungskategorien verknüpft, um potentielle Umweltwirkungen aus diesen Daten ableiten zu können. Die Phase der Wirkungsabschätzung muss mit den anderen Phasen der Ökobilanz abgestimmt sein, um Fehlerquellen oder Auslassungen richtig zu beurteilen. Ein verbindlicher Bestandteil der Wirkungsabschätzungsphase umfasst die Sammlung von Indikatorwerten für die verschiedenen Wirkungskategorien.⁹¹ Nach der ISO 14044 sind dies:⁹²

- die Auswahl der Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen,
- die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den ausgewählten Wirkungskategorien (Klassifizierung) und
- die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte (Charakterisierung).

Die Norm gibt keine Wirkungskategorien vor, so obliegt es dem Ersteller der Ökobilanz, die Wirkungskategorien auszuwählen. In Abbildung 18 werden eine Reihe von möglichen Wirkungskategorien angegeben. Der Begriff Schadenskategorie gibt dabei den Bereich der Umwelt an, der dem Einfluss der Wirkungskategorie unterliegt.⁹³

⁹⁰ Vgl. (Feifel et al., 2010), S. 49f.

⁹¹ Vgl. (Österreichisches Normungsinstitut, 2006), S. 23f; vgl. (Klöpffer & Grahl, 2014), S. 195f.

⁹² (Österreichisches Normungsinstitut, 2006), S. 24.

⁹³ Vgl. (Klöpffer & Grahl, 2014), S. 203; vgl. (Jolliet et al., 2003), S. 325.

Wirkungskategorie	Schadenskategorie
Humantoxizität	Menschliche Gesundheit
Effekte auf die Atmung	
Ionisierende Strahlung	
Ozonschichtzerstörung	
Photochemische Oxidation	Qualität von Ökosystem
Aquatische Ökotoxizität	
Terrestrische Ökotoxizität	
Aquatische Versauerung	
Aquatische Eutrophierung	
Terrestrische Versauerung und Eutrophierung	Klimaerwärmung
Landnutzung	
Globale Erwärmung	Ressourcen
Nicht erneuerbare Energie	
Abbau von Mineralien	

Abbildung 18: Mögliche Wirkungskategorien und dazugehörige Schadenskategorien.⁹⁴

Der nächste Schritt der Wirkungsabschätzungsphase ist die Klassifizierung. Hier werden den Sachbilanzergebnissen die Wirkungskategorien zugeordnet. Abschließend werden ausgehend von den Sachbilanzergebnissen und der Hilfe von Indikatormodellen und Charakterisierungsfaktoren die Wirkungsindikatoren berechnet. Abbildung 19 zeigt das Prinzip der Klassifizierung sowie der Charakterisierung am Beispiel der Klimaänderung.⁹⁵

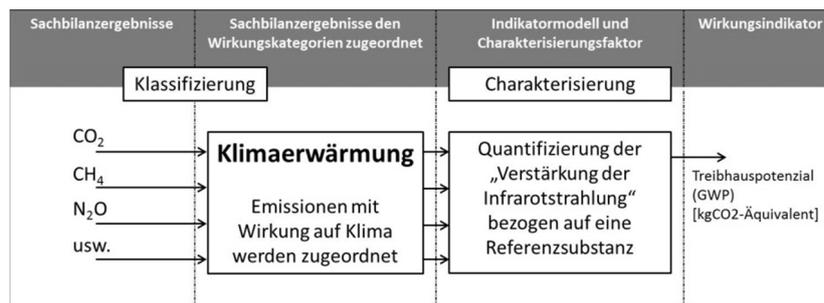


Abbildung 19: Prinzip der Klassifizierung und Charakterisierung in der Wirkungsabschätzung.⁹⁶

Wie in Abbildung 19 ersichtlich, werden alle klimarelevanten Sachbilanzergebnisse der Wirkungskategorie „Klimaerwärmung“ zugeordnet und anschließend auf das „Treibhauspotenzial“ bzw. „Global Warming Potential“ (GWP) umgerechnet.⁹⁷

4.3.4 Auswertung

Die Auswertung ist die vierte Phase der Ökobilanz. Auf Grundlage der vorherigen Ergebnisse von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung soll sie der Identifizierung von signifikanten Parametern dienen. Aus ihr sollen Schlussfolgerungen gezogen und

⁹⁴ Eigene Darstellung in Anlehnung an (Jolliet et al., 2003), S. 325.

⁹⁵ Vgl. (Österreichisches Normungsinstitut, 2006), S. 27. vgl. (Klöpffer & Grahl, 2014), S. 205.

⁹⁶ Eigene Darstellung in Anlehnung an (Klöpffer & Grahl, 2014), S. 206.

⁹⁷ Vgl. (Klöpffer & Grahl, 2014), S. 206.

Empfehlungen bzw. Einschränkungen gegeben werden. Die Auswertung setzt sich laut ISO 14044 aus folgenden Bestandteilen zusammen:⁹⁸

- Identifizierung von signifikanten Parametern auf Basis der Sachbilanz- und Wirkungsabschätzungsphase,
- eine Beurteilung durch Vollständigkeits-, Sensitivitäts-, und Konsistenzprüfung und
- Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Einschränkungen.

In den vorherigen drei Kapiteln wurde die Theorie zu den Treibhausgasemissionen, die aktuellen Gesetzgebung und ihre Entwicklung sowie die Grundlagen zur Ökobilanz nach ISO 14040 und ISO 14044 erläutert. In den anschließenden Kapiteln werden die Tätigkeiten zur Ermittlung der Produktionsdaten hinsichtlich Energiebedarfs und Treibhausgasemissionen, die für diese Arbeit durchgeführten wurden, beschrieben.

⁹⁸ Vgl. (Österreichisches Normungsinstitut, 2006), S. 31. vgl. (Klöpffer & Grahl, 2014), S. 355.

5 Analyse von Massen- und Werkstoffanteilen ausgewählter Fahrzeugkomponenten

Zur Erfassung des Produktionsaufwandes eines Fahrzeuges ist die Erkenntnis erforderlich, aus welchen Fahrzeugkomponenten ein Fahrzeug besteht. Des Weiteren muss bekannt sein aus welchen Werkstoffen die Komponenten hergestellt sind und welche Massenanteile diese haben. Um einen Überblick über die verwendeten Werkstoffe und der Masse von ausgewählten Fahrzeugkomponenten zu bekommen, wurde eine Analyse zur Ermittlung dieser Daten durchgeführt. Im folgenden Kapitel soll ein Überblick über Fahrzeugsegmente und den Aufbau eines Fahrzeuges gegeben werden. Anschließend werden die Methodik der Analyse und die Ergebnisse der Untersuchung beschrieben.

5.1 Allgemeines zu Fahrzeugsegmenten und zum Aufbau eines Fahrzeuges

Die EU-Kommission gibt eine Einordnung der verschiedenen Personenkraftwagen in Fahrzeugsegmente vor. In Tabelle 7 sind die unterschiedlichen Segmente mit den dazugehörigen Marktanteilen der neuzugelassenen PKW in der EU und dem durchschnittlichen Leergewicht der Fahrzeuge aufgelistet.⁹⁹

Segment	Beispiele	∅-Leergewicht ¹⁰⁰ [kg]	Marktanteil 2014 ¹⁰¹ [%]
Kleinstwagen (A)	Fiat 500, Opel Adam	984	9,0
Kleinwagen (B)	Opel Corsa, Renault Clio	1167	24,1
Mittelklasse (C)	VW Golf, Ford Focus	1389	30,6
Obere Mittelklasse (D)	Audi A4, BMW 3er	1623	8,4
Mehrzweck (M)	Ford C-Max, VW Caddy	1494	1,4
Oberklasse (E)	Audi A6, BMW 5er	1825	2,9
Luxusklasse (F)	BMW 7er, Audi A8	2066	0,3
SUV (J)	Audi Q5, VW Tiguan	1584	19,7
Sportwagen (S)	Audi TT, Porsche 911	1582	1,4

Tabelle 7: Einteilung der Fahrzeugsegmente laut EU-Kommission.¹⁰²

⁹⁹ Vgl. (Europäische Union, 2002), S. 82. vgl. (RWTH Aachen, 2012), S. 27.

¹⁰⁰ Vgl. <http://eupocketbook.theicct.org/data/pc-data-segment>; Zugriffsdatum: 18.3.2016.

¹⁰¹ Ebenda.

¹⁰² In Anlehnung an (RWTH Aachen, 2012), S. 27.

Deutlich ersichtlich ist der große Marktanteil der neuzugelassenen PKW im C-Segment, gefolgt vom B-Segment und dem J-Segment, im Gegensatz zu den Fahrzeugen im F- und S-Segment.

Ein Fahrzeug besteht im Allgemeinen aus verschiedenen Baugruppen wie Karosserie, Interieur (Lenksystem, Sitze, Cockpit, Mittelkonsole), Fahrwerk, Antriebsstrang, Kabelbaum, Elektronik und verschiedenen Systemen wie Klimaanlage, Wasserkühlung und Sicherheitssystem. Ein Fahrzeug besteht dabei insgesamt aus rund 10.000 Einzelteilen.¹⁰³ In Abbildung 20 sind die einzelnen Fahrzeugkomponenten eines VW Golf 5 abgebildet.



Abbildung 20: Komponenten eines VW Golf 5.¹⁰⁴

5.2 Methodik zur Fahrzeugkomponentenanalyse

Die Werkstoff- und Massenanalyse der Fahrzeugkomponenten wurde mit Hilfe der Datenbank von A2Mac¹⁰⁵ durchgeführt. Basierend auf den Daten von A2Mac ist es möglich, eine bauteilspezifische Werkstoff- und Massenbilanz zu erstellen. Die Struktur der Aufschlüsselung der Fahrzeugbaugruppen in ihre Einzelteile wurde von A2Mac

¹⁰³ Vgl. A2MAC1; vgl. (Braess & Ulrich, 2013); vgl. (Gruden, 2008), S. 289.

¹⁰⁴ www.autobild.de/bilder/gebrachtwagen-golf-v-10-2008-796068.html#bild11; Zugriffsdatum: 18.3.2016.

¹⁰⁵ www.a2mac1.com; Zugriffsdatum: 12.3.2016.

übernommen (siehe Abbildung 21). Anschließend wurden Werkstoff und Masse der Einzelteile für verschiedene Fahrzeuge unterschiedlicher Segmente erfasst und in die Fahrzeugdatenbank übertragen. Schwierigkeiten ergaben sich durch die Komplexität der Fahrzeugkomponenten und die große Anzahl an Einzelteilen, weshalb die Annahme getroffen wurde, nur die wichtigsten Teile der Komponenten in die Analyse miteinzubeziehen. Durch diese getroffene Annahme ergeben sich Ungenauigkeiten bezüglich der Masseanteile.

5.2.1 Fahrzeugkomponentenanalyse

Die Untersuchung der Masse und des Werkstoffes von Fahrzeugkomponenten wurde für 31 Fahrzeuge in den Fahrzeugsegmenten A, B, C, F und J sowie eines zusätzlichen Segments für kompakte SUV durchgeführt. In Tabelle 8 sind die betrachteten Fahrzeugsegmente und die ausgewählten Fahrzeuge der Untersuchung ersichtlich. Die genaue Typenbezeichnung der Fahrzeuge ist in Anhang A (Typbezeichnung der untersuchten Fahrzeuge) beschrieben.

A	B	C	F	kSUV ¹⁰⁶	J
Fiat Panda	Alfa Romeo Mito	Alfa Romeo Giulietta	Audi A7	Audi Q3	BMW X5
Opel Adam	Audi A1	Audi A3	Audi A8	BMW X1	Porsche Cayenne
Toyota Aygo	BMW i3	BMW 118i	BMW 7	Dacia Duster	VW Touareg
VW Up	Renault Clio	Citroen C4			
VW eUp	Suzuki Swift	Ford Focus			
	VW Polo	Mazda 3			
		Mercedes B-Klasse			
		Mini Countryman			
		Opel Astra			
		Peugeot 308			
		VW Golf VI			
5 PKW	6 PKW	11 PKW	3 PKW	3 PKW	3 PKW

Tabelle 8: Verwendete Segmente mit Auflistung der untersuchten Fahrzeuge.¹⁰⁷

Die Baugruppen Karosserie und Antriebstrang wurden bereits in den Arbeiten von Zottler¹⁰⁸ und Maurer¹⁰⁹ bearbeitet.

Für die spätere Analyse des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen der Produktion wurden eine Werkstoff- und eine Massenbilanz, basierend auf festgelegte

¹⁰⁶ Kompakt Sport Utility Vehicle.

¹⁰⁷ Eigene Darstellung.

¹⁰⁸ Vgl. (Zottler, 2014).

¹⁰⁹ Vgl. (Maurer, 2013).

5.3 Massen- und Werkstoffbilanz der Komponenten

Für jede untersuchte Fahrzeugkomponente wird jeweils ein Überblick über die Bestandteile und die Werkstoffe gegeben, die laut Fachliteratur im Automobilbau verwendet werden. Anschließend werden die Ergebnisse der Werkstoff- und Massenanalyse dargelegt.

5.3.1 Cockpit

Bestandteile

Im Cockpit sind die Anzeige- und Bedienelemente (Instrumente, Navigationsbildschirm, Radio, Lichtschalter) sowie Airbagsysteme für den Beifahrer untergebracht. Handschuhfach und weitere Staufächer sind zusätzliche Teile des Cockpits. Die Hauptelemente des Cockpits sind der Querrohrträger, die Instrumententafel (Außenhaut), die Instrumente und der Body. Am Querrohrträger werden sämtlich Teile des Cockpits angebaut. Die Instrumententafel kann aus einem oder mehreren Teilen bestehen. Als Werkstoff für den Querrohrträger wird Stahl, Aluminium, Magnesium oder Kunststoff verwendet. Aus Gründen des Leichtbaus kommen zunehmend Hybridkonstruktionen zum Einsatz.¹¹¹ In Abbildung 22 sind die Bestandteile des Cockpits dargestellt.

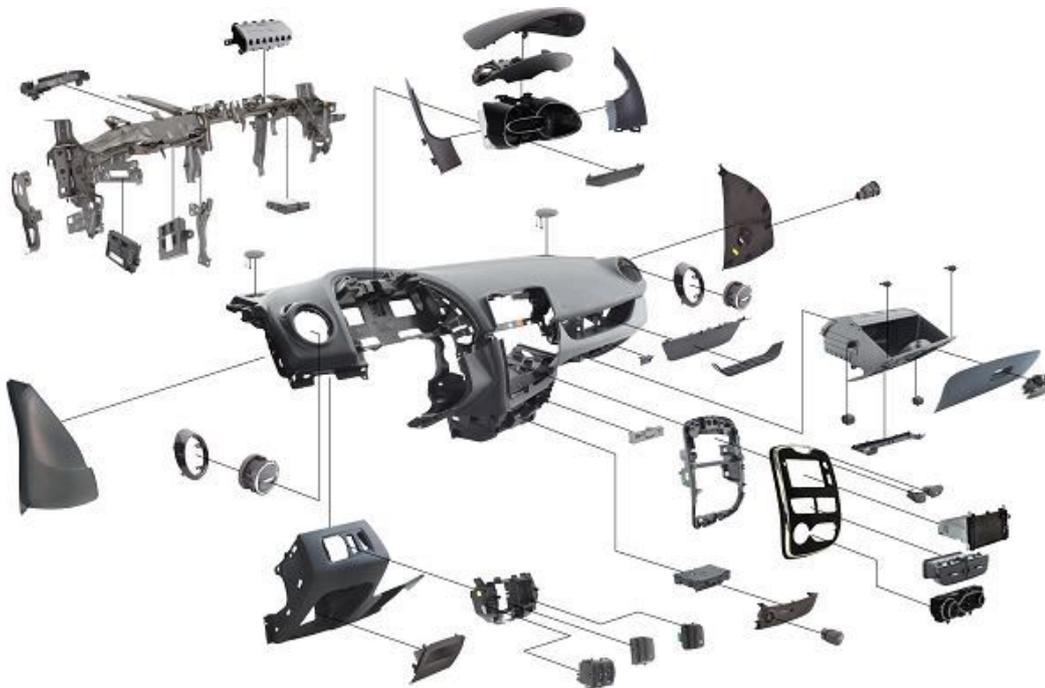


Abbildung 22: Aufbau und Bestandteile des Cockpits eines Renault Clio 2013.¹¹²

¹¹¹ Vgl. (Braess & Ulrich, 2013), S. 616.

¹¹² A2Mac1 Renault Clio 0.9 TCe Dynamique.

Massen- und Werkstoffbilanz

Abhängig vom Segment wird bei den analysierten Fahrzeugen Stahl oder eine Magnesiumlegierung als Werkstoff für den Querrohrträger verwendet. Die Außenhaut besteht entweder aus Polypropylen (PP) oder Acrylnitril-Butadien-Styrol/Polycarbonat (ABS-PC). Als Werkstoff für den Body wird PP, ABS-PC oder Polyurethan (PUR) eingesetzt. Als elektronische Komponenten werden die elektronischen Teile der Instrumententafel, die Knöpfe von Bedienelementen und das LCD-Display bezeichnet. Während in der Massenbilanz der Beifahrerairbag berücksichtigt wird, bleibt das Radiosystem davon ausgenommen (siehe Kapitel 5.5). In Abbildung 23 ist die Gewichts- und Werkstoffbilanz des Cockpits dargestellt. Die Abkürzungen in der Säulenbeschriftung der Abbildung stehen für den Werkstoff des Querrohrträgers und das Fahrzeugsegment. Ein PKW aus dem C-Segment mit einem Querrohrträger aus einer Magnesiumlegierung wird beispielsweise mit C/MgAl abgekürzt. Eine Aufschlüsselung der Werkstoffe und Massen ist in Anhang B, Tabelle 52 gegeben.

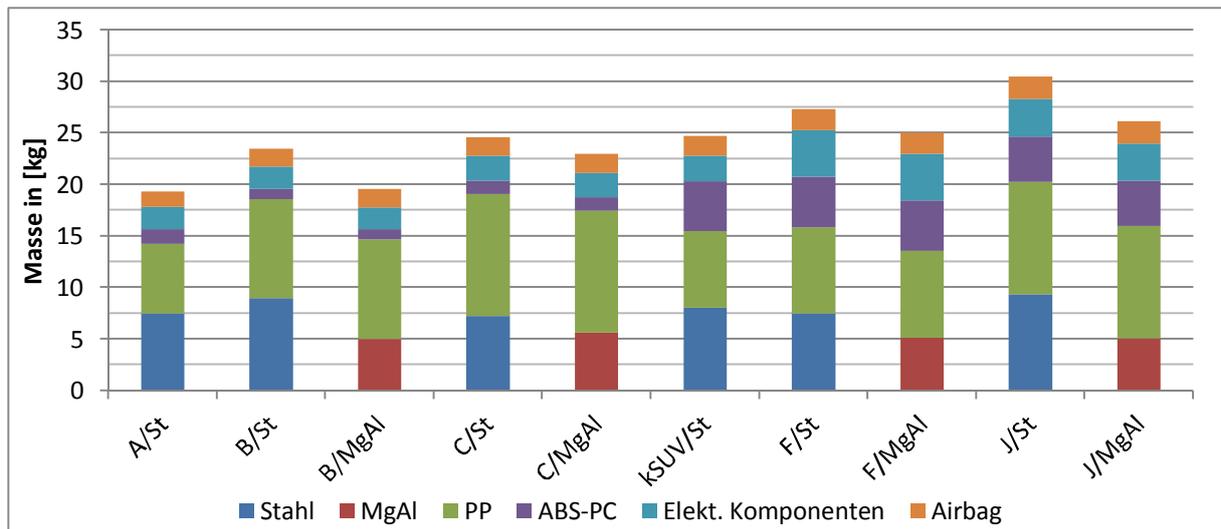


Abbildung 23: Masse- und Werkstoffbilanz Cockpit. (St- Stahl, MgAl- Magnesiumlegierung)¹¹³

5.3.2 Lenkrad

Bestandteile

Ein Lenkrad besteht im Wesentlichen aus einem Metallskelett, welches mit Polyurethanschaum umgeben ist, der Airbageinheit und verschiedenen Abdeckungen. Bei modernen Multifunktionslenkrädern sind zusätzlich noch elektronische Bedienelemente integriert. Als Werkstoff für das Metallskelett kommt entweder eine hochfeste Aluminiumlegierung oder eine Magnesiumlegierung zum Einsatz.¹¹⁴

¹¹³ Eigene Darstellung.

¹¹⁴ Vgl. (Braess & Ulrich, 2013), S. 602, 1052 und 1054.

Abbildung 24 zeigt links den inneren Aufbau eines Lenkrades, rechts das Lenkrad des VW Golf VI mit den Bestandteilen.



Abbildung 24: Links: Aufbau eines Lenkrades¹¹⁵ und rechts: Lenkrad des VW Golf VI 2009.¹¹⁶

Massen- und Werkstoffbilanz

Die Untersuchung bestätigt, dass das Metallskelett im Inneren des Lenkrades aus einer Magnesiumlegierung oder aus Aluminium besteht. Die A2Mac-Datenbank gibt ausschließlich Werte für den Lenkradkern inklusive PUR-Umschäumung an, deshalb muss eine Annahme für die Masse des Lenkradkerns getroffen werden. Nach Ehrenberger¹¹⁷ beträgt die Masse des Kerns aus Magnesiumlegierung 0,55 kg und 0,74 kg bei einem Aluminiumkern. Die Masse des PUR-Schaumes wird anschließend aus der Gesamtmasse des umschäumten Lenkrades und der angenommenen Masse des Lenkradkerns berechnet. Die Abdeckungen auf der Vorderseite des Lenkrades bestehen aus PP oder ABS-PC. In den Fahrzeugsegmenten F und J ist der PUR-Schaum zusätzlich mit Leder oder Stoff umschlossen. Der Fahrerairbag ist in der Massenbilanz berücksichtigt. Die elektrischen Bedienelemente am Lenkrad werden als elektronische Komponenten bezeichnet. Eine Aufschlüsselung der einzelnen Werkstoffe ist in Abbildung 25 und in Anhang B, Tabelle 53 zu einzusehen.

¹¹⁵ www.khw-techdok.de/Leistungen/Lei0-Erklaerung/Leistungen-30.htm; Zugriffsdatum 10.6.2015.

¹¹⁶

www.aceonline.de/fileadmin/user_uploads/Der_Club/Bilder/Lenkrad/Autotests/VW/Golf_6/ACE_10_08_S13a_Cockpit.jpg; Zugriffsdatum: 4.4.2016.

¹¹⁷ Vgl. (Ehrenberger, 2013), S. 45.

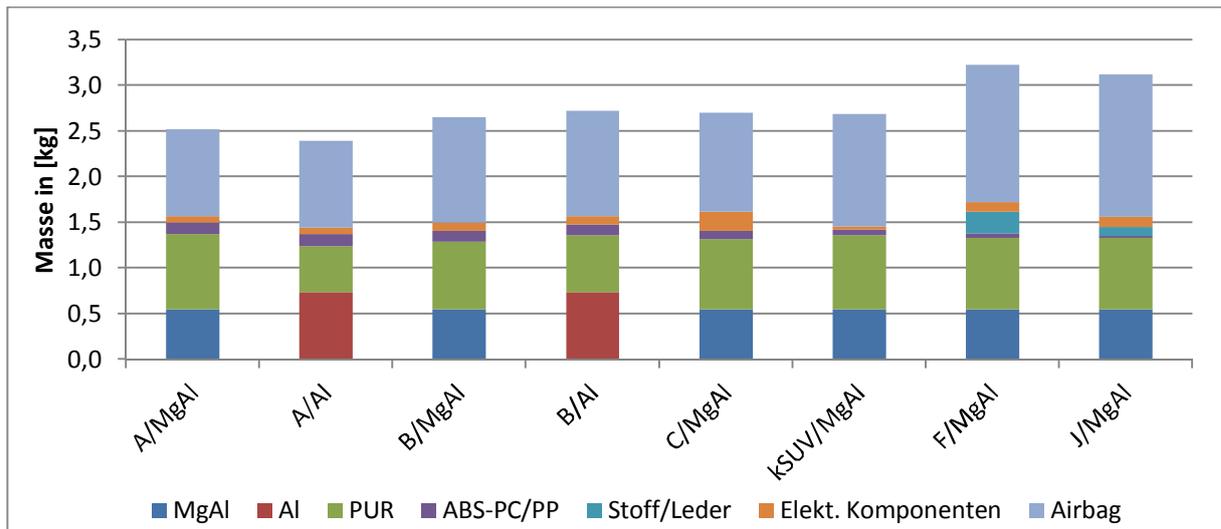


Abbildung 25: Masse- und Werkstoffbilanz des Lenkrades. (Al: Aluminium, MgAl: Magnesiumlegierung).¹¹⁸

5.3.3 Fahrersitz, Beifahrersitz, Rückbank

Bestandteile

Ein Sitz besteht im Allgemeinen aus einer Sitzstruktur, der Sitzpolsterung, dem Sitzbezug und der Elektronik/Komfortmechanik. Die Sitzstruktur der Sitze besteht aus Stahl in Form von Formblechen oder Rohrrahmen. Zum Schutz vor Korrosion werden die Oberflächen der Stahlteile mit einer Zinkschicht überzogen. Selten kommen Werkstoffe wie Aluminium, Magnesium oder Kunststoffe zum Einsatz. Die Sitzpolsterungen sind aus Polyurethanschaum gefertigt. Der Sitzbezug wird vor allem aus Polyesterfasern (PET) oder aus Leder hergestellt, selten aus Polyamid (PA) oder Wolle.¹¹⁹ In Abbildung 26 sind die Bestandteile des Fahrersitzes eines Audi A3 abgebildet.

¹¹⁸ Eigene Darstellung.

¹¹⁹ Vgl. (Braess & Ulrich, 2013), S. 618f. und 1058f.; vgl. (Fung & Hardcastle, 2001), S. 110.



Abbildung 26: Aufbau des Fahrersitzes (Audi A3 1.4 TFSi Attraction).¹²⁰

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Einzelteilen gewährleisten zu können, wird in dieser Arbeit eine Rückbank mit einer Sitzbank und einer zweigeteilten Rückenlehne als Standard angenommen. Rückbänke von Fahrzeugen, welche diese Struktur nicht aufweisen, werden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Dies trifft bei 10 von 31 Fahrzeugen zu. In Abbildung 27 sind die Bestandteile der Rückbank eines BMW 118i dargestellt.



Abbildung 27: Aufbau der Rückbank (BMW 118i).¹²¹

¹²⁰ A2Mac1 Audi A3 1.4TFSi Driver Seat.

¹²¹ A2Mac1 BMW 1 Series 118i Rear Seat.

Massen- und Werkstoffbilanz

Aus der Werkstoffanalyse geht hervor, dass die Sitzstruktur aus Stahlformblechen besteht. Für die Sitzpolsterung kommt Polyurethanschaum zum Einsatz. Der Sitzbezug ist aus PET-, PVC-, PA-Stoff oder Leder gefertigt. Zusatzkomponenten wie Abdeckungen oder innere Verstärkungen der Kopfstütze bestehen aus Kunststoffen wie PE, PA, ABS-PC oder PP. Die Seitenairbags in den Sitzen sind in den Massenbilanzen von Fahrer- und Beifahrersitz berücksichtigt. In den Segmenten C, F und J kommen zur Erhöhung des Komforts vermehrt elektrische Bedienkomponenten und Motoren, etwa zur Verstellbarkeit der Sitze, zum Einsatz. Die Gesamtmasse des Fahrersitzes ist im A-Segment erwartungsgemäß am niedrigsten und im F-Segment am höchsten. Ähnlich ist die Situation beim Beifahrersitz und der Rückbank. Die Säulenbezeichnungen stehen für das jeweilige Segment und die Art des Sitzbezuges (Stoff oder Leder). Eine Aufschlüsselung der Massebilanz von Fahrersitz, Beifahrersitz und Rückbank ist in Abbildung 28, Abbildung 29, Abbildung 30 sowie in Anhang B, Tabelle 54 bis Tabelle 56 ersichtlich.

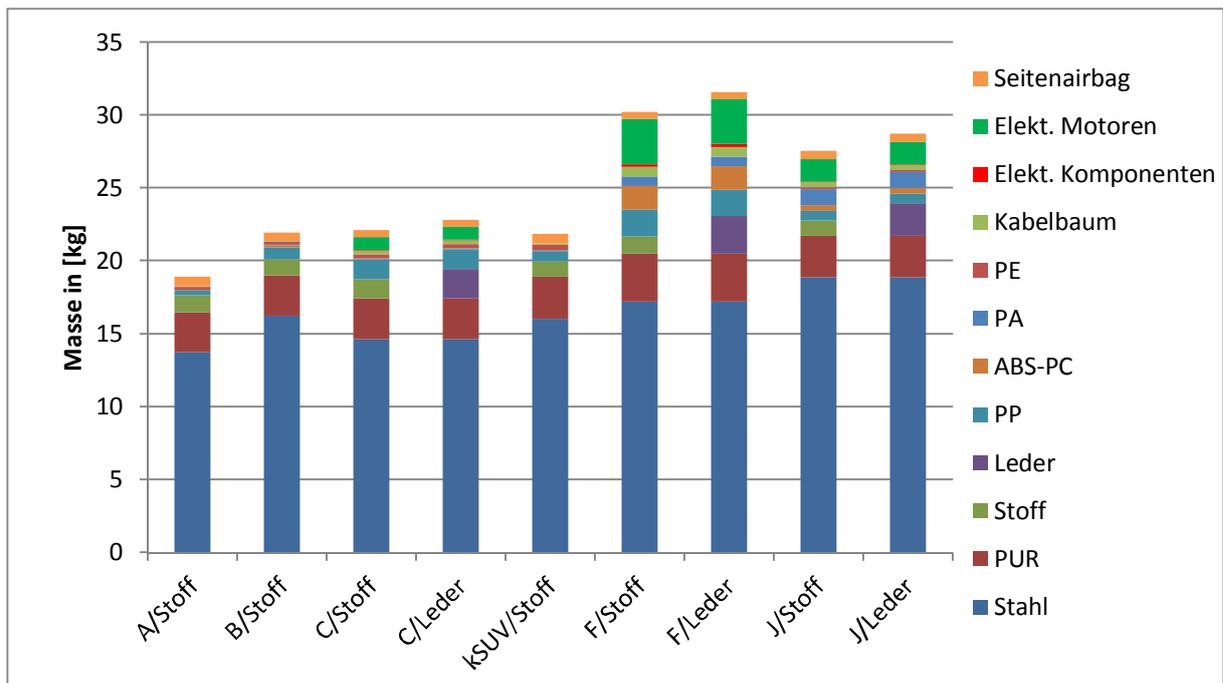


Abbildung 28: Masse- und Werkstoffbilanz von Fahrersitzen in verschiedenen Segmenten (Sitzbezug aus Stoff bzw. Leder).¹²²

¹²² Eigene Darstellung.

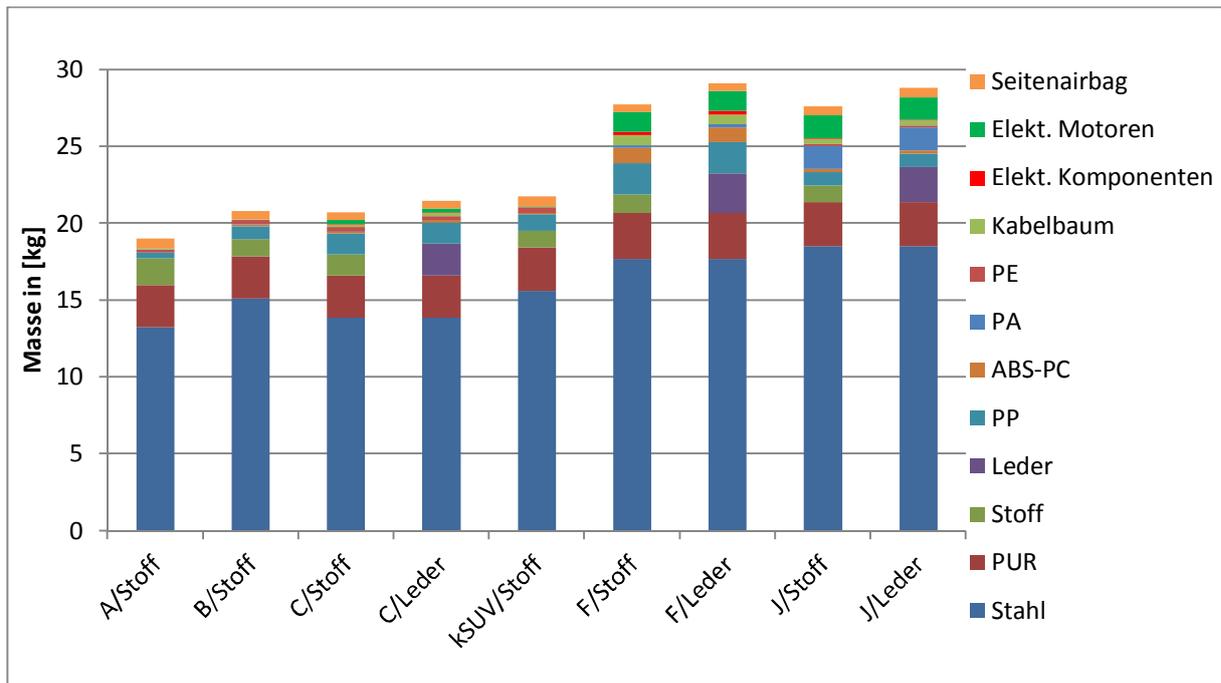


Abbildung 29: Masse- und Werkstoffbilanz Beifahrersitz (Sitzbezug aus Stoff bzw. Leder).¹²³

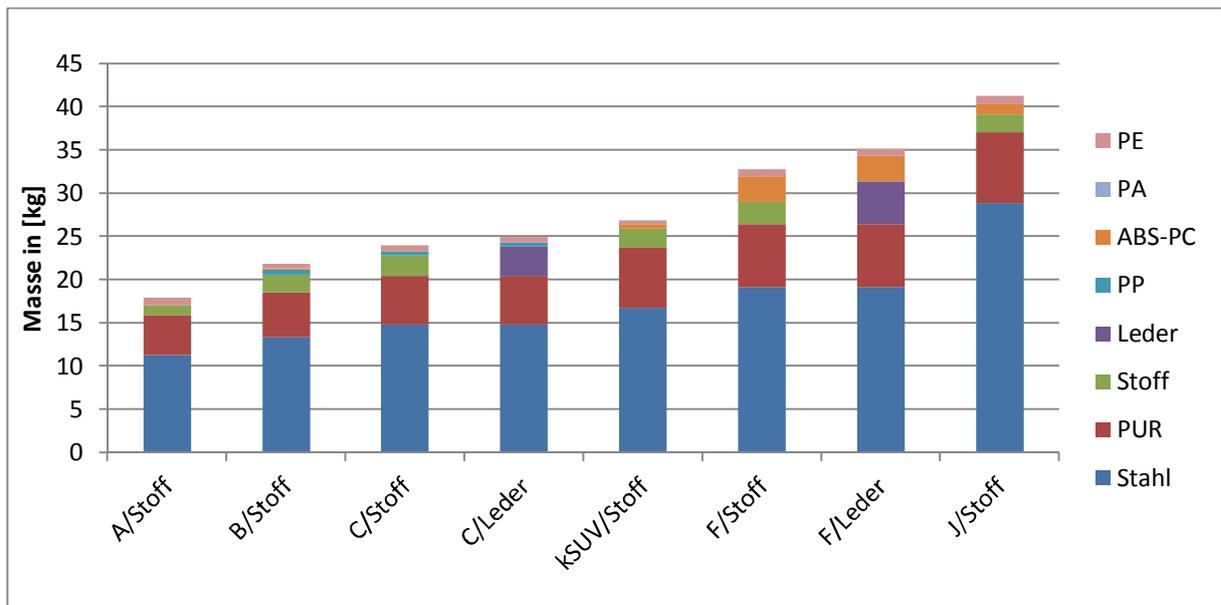


Abbildung 30: Masse- und Werkstoffbilanz Rückbank (Sitzbezug aus Stoff bzw. Leder).¹²⁴

5.3.4 Windschutzscheibe, Seitenscheiben, Heckscheibe

Bestandteile

Bei den Scheiben im Automobilbau wird generell zwischen Einscheibensicherheitsglas (ESG) und Verbundsicherheitsglas (VSG) unterschieden.¹²⁵

¹²³ Eigene Darstellung.

¹²⁴ Eigene Darstellung.

Unter ESG versteht man thermisch vorgespanntes Glas. Dabei wird die Flachglasscheibe auf ca. 630 °C aufgeheizt und durch eine Luftdusche schnell abgekühlt. Durch diese thermische Behandlung entwickelt sich in der Scheibe ein parabelförmiges Spannungsprofil (siehe Abbildung 31 links), welches für die Festigkeitssteigerung verantwortlich ist. Wird die Biegespannung überschritten, so bricht das ESG. Die Bruchstücke weisen stumpfe Kanten auf, dies mindert das Risiko von Schnittverletzungen. Anwendung finden ESG im Automobilbau als Seiten- und Heckscheiben.¹²⁶

Beim VSG werden zwei Flachglasscheiben mit einer zähen, hochreißfesten Folie aus Polyvinyl-Butyral (PVB) zu einer transparenten Einheit vereint (siehe Abbildung 31 rechts). Dieser Schichtverbund ist für die Festigkeitssteigerung verantwortlich. Bei Überlast bricht das Glas, die Bruchstücke haften jedoch an der PVB-Folie. Anwendung finden VSG deshalb im Automobilbau als Windschutzscheibe. Die Windschutzscheiben haben dabei eine Dicke von 5–6 mm.¹²⁷

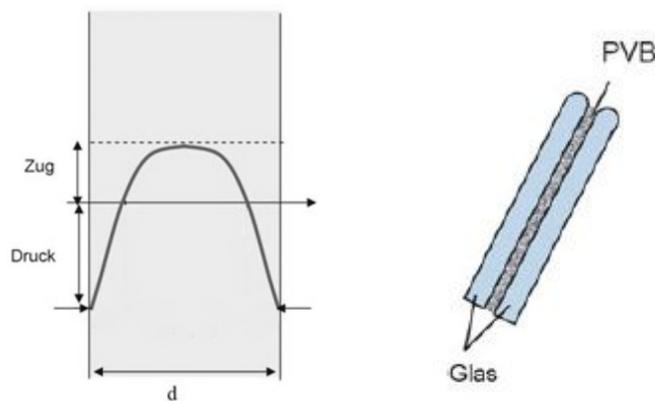


Abbildung 31: Links: Parabelförmiges Spannungsprofil des ESG nach der thermischen Behandlung;¹²⁸ rechts: Aufbau von Verbundsicherheitsglas.¹²⁹

Massen- und Werkstoffbilanz

Die Masse der Windschutzscheibe aus VSG beträgt abhängig vom Segment zwischen 11,43 kg und 14,27 kg. Die Seitenscheiben und die Heckscheibe schlagen sich mit 17,95 kg bis 30,85 kg in der Massebilanz nieder. In Abbildung 32 ist die Verteilung der Massenbilanz auf die Fahrzeugsegmente ersichtlich. Eine Auflistung der Werte ist in Anhang B, Tabelle 57 gegeben.

¹²⁵ Vgl. (Braess & Ulrich, 2013), S. 1073.

¹²⁶ Vgl. (Schaeffer & Langfeld, 2014), S. 89f.

¹²⁷ Vgl. (Schaeffer & Langfeld, 2014), S. 93; vgl. (Braess & Ulrich, 2013), S. 1073.

¹²⁸ Abbildung (Schaeffer & Langfeld, 2014), S. 90.

¹²⁹ Abbildung (Schaeffer & Langfeld, 2014), S. 93.

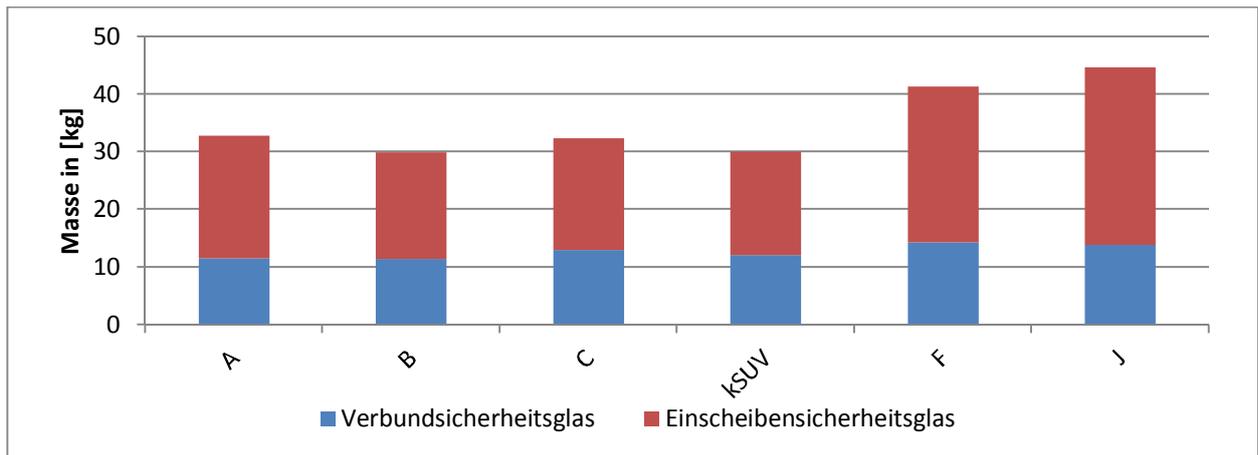


Abbildung 32: Masse- und Werkstoffbilanz Scheiben.¹³⁰

5.3.5 Ausgewählte Komponenten im Motorraum

Bestandteile

Im Motorraum befinden sich neben dem Motor und sämtlichen Nebenaggregaten auch die Behälter für Kühlflüssigkeit, Bremsflüssigkeit und Scheibenflüssigkeit. Weitere in dieser Arbeit untersuchte Bestandteile sind Motorabdeckungen und Abdeckungen für den Luftfilter. In Abbildung 33 ist der Motorraum des VW Golf VI 1.4 TSi abgebildet, die untersuchten Komponenten sind rot markiert. Links die Behälter für Kühl- und Scheibenflüssigkeit, in der Mitte die Motorabdeckung und rechts die Abdeckungen für den Luftfilter. Hinter dem Lufteinlasskanal befindet sich der Behälter für die Bremsflüssigkeit.

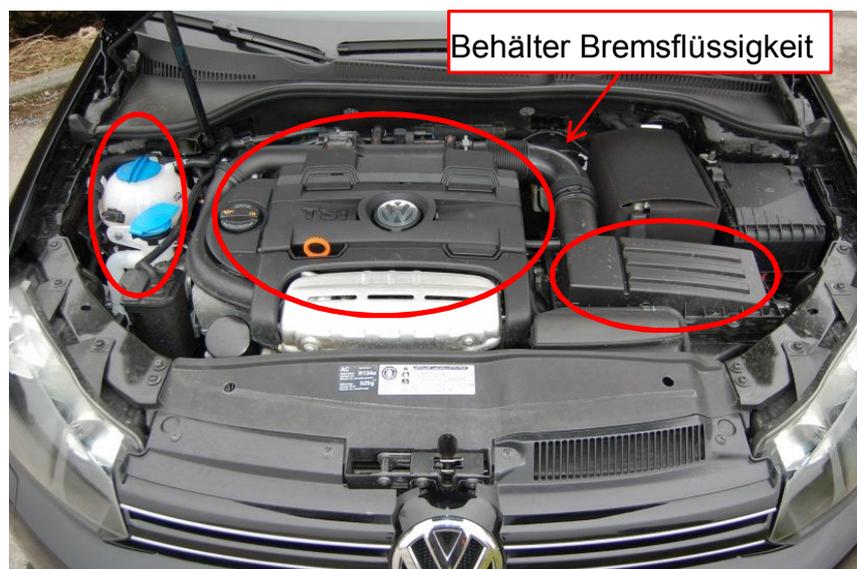


Abbildung 33: Motorraum eines VW Golf VI 1.4 TSi.¹³¹

¹³⁰ Eigene Darstellung.

¹³¹ Abbildung aus A2Mac1 VW Golf VI 1.4 TSi Highline.

Massen- und Werkstoffbilanz

In die Analyse einbezogen wurden die Behälter für Kühl-, Brems-, Scheibenflüssigkeit, das Lufteinlasssystem und die Motorabdeckung. Die Flüssigkeitsbehälter bestehen vor allem aus Polypropylen (PP). Die Motorabdeckung ist in allen Segmenten aus Polyamid (PA). Zusätzlich ist das Lufteinlasssystem im F-Segment aus PA. In Abbildung 34 ist die Masse von PP und PA der analysierten Teile dargestellt. Die detaillierten Werte sind in Anhang B, Tabelle 58 ersichtlich.

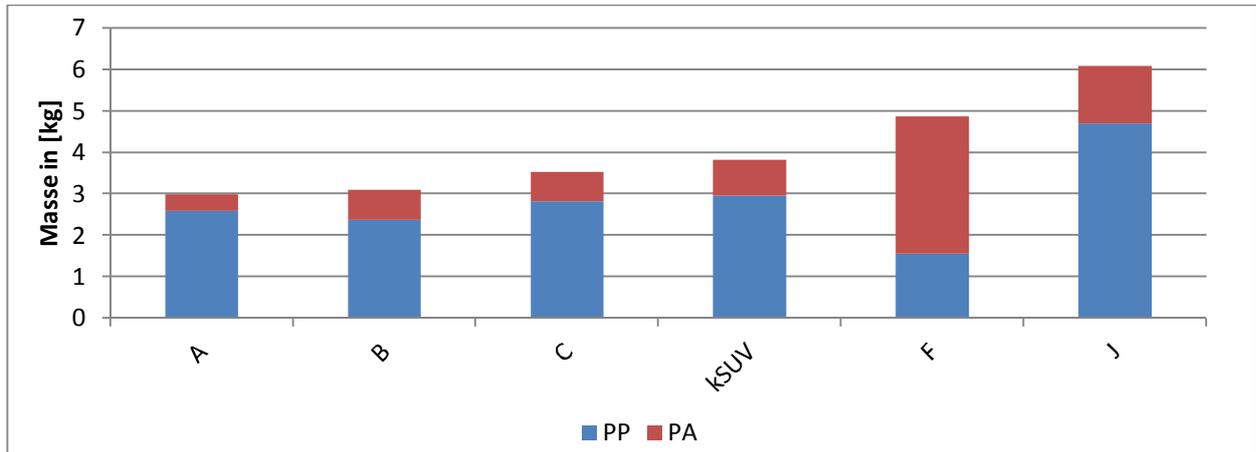


Abbildung 34: Masse- und Werkstoffbilanz Motorraum.¹³²

5.3.6 Bordelektronik (ECUs, Batterie, Kabelbaum)

5.3.6.1 Bestandteile

Die Bordelektrik besteht im Wesentlichen aus Steuergeräten¹³³, dem Kabelbaum, der Batterie, dem Generator und den elektrischen Verbrauchern wie der Kraftstoffpumpe, der Heckscheibenheizung, dem Innengebläse etc.¹³⁴ Durch den Wunsch nach mehr Sicherheit und Komfort im Fahrzeug steigt die Anzahl der elektronischen Systeme stetig an. So hat sich die Anzahl der Steuergeräte in den letzten Jahren vervielfacht.¹³⁵

Im Folgenden werden die Komponenten ECU, Kabelbaum und Starterbatterie sowie die dazugehörige Massenbilanz näher beschrieben.

ECU

Die Steuergeräte sind für die Steuerung elektrischer Systeme im Fahrzeug verantwortlich. Sie empfangen die elektrischen Signale der Sensoren, werten diese aus und berechnen Ansteuersignale für Aktuatoren. Sie bestehen aus einer Leiterplatte und

¹³² Eigene Darstellung.

¹³³ Engl.: Electronic control unit (ECU).

¹³⁴ Vgl. (Borgeest, 2014), S. 4.

¹³⁵ Vgl. (Borgeest, 2014), S. 11ff; vgl. (Babiel, 2014), S. 23; vgl. (Reif, 2011), S. 82f.

einem Kunststoff- oder Metallgehäuse.¹³⁶ In Abbildung 35 ist der Aufbau einer ECU dargestellt.

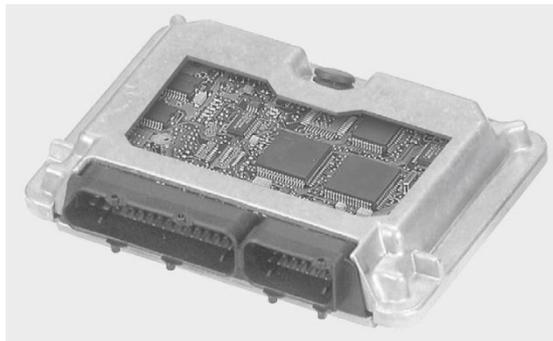


Abbildung 35: Aufbau einer ECU (mit aufgeschnittenem Gehäusedeckel).¹³⁷

In den Fahrzeugen gibt es eine Vielzahl an Steuergeräten. In der Oberklasse sind beispielsweise bis zu 80 eingebaut.¹³⁸ In der Massenbilanz berücksichtigt sind alle Steuergeräte, welche in der A2Mac-Datenbank als Steuergerät definiert sind. In allen Fahrzeugsegmenten enthalten sind die Steuergeräte für das Motormanagement und das Bordnetzwerk. Zusätzlich kommen in den oberen Klassen Steuergeräte für den Start-Stopp Betrieb, die Klimaanlage, das Fahrwerk, die Kraftstoffpumpe, den Park- und Spurassistent, das Automatikgetriebe etc. zum Einsatz. Die Anzahl der berücksichtigten Steuergeräte in der Untersuchung schwankt nach Durchsicht der A2Mac-Datenbank zwischen 2 im A-Segment und 22 im F-Segment. Die Massenanteile der ECUs sind in Abbildung 38 zu sehen.

Kabelbaum

Der Kabelbaum dient der Energie- und Signalverteilung innerhalb des Fahrzeugs. In einem durchschnittlichen PKW des C-Segments besteht der Kabelbaum aus rund 750 unterschiedlichen Leitungen mit einer Gesamtlänge von ca. 1500 Metern. Die Leitungen im Kabelbaum werden in flexiblen Kunststoffschläuchen oder grobmaschigen Textilschläuchen gebündelt. Die Leiterquerschnitte bewegen sich zwischen 0,5 mm² und 6 mm² für Standardkabel im Fahrzeug. Für die Starterbatterie sind Querschnitte zwischen 10 mm² bis 120 mm² vorgesehen.¹³⁹ In Abbildung 36 ist ein Fahrzeugkabelbaum dargestellt.

¹³⁶ Vgl. (Reif, 2011), S. 198.

¹³⁷ (Reif, 2011), S. 199.

¹³⁸ Vgl. (Reif, 2011), S.12.

¹³⁹ Vgl. (Reif, 2011), S. 450; vgl. (Borgeest, 2014), S. 5f; vgl. www.caledonian-cables.com/product/automotive-cables/FLY.htm; Zugriffsdatum: 11.11.2015.

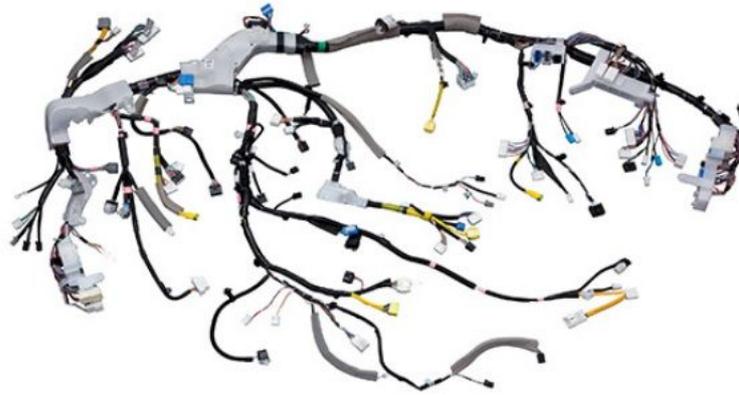


Abbildung 36: Darstellung Kabelbaum.¹⁴⁰

Starterbatterie

Im Fahrzeug hat sich der Bleiakкумуляtor als Starterbatterie durchgesetzt. Fahrzeuge, die mit elektrischem Antrieb betrieben werden, besitzen eine Traktionsbatterie (Nickel-Metallhydrid- oder Lithium-Ionen-Akkumulatoren) und zusätzlich einen Bleiakкумуляtor als Nebenbatterie für das Bordnetzwerk.¹⁴¹ In Abbildung 37 ist der Aufbau eines Bleiakкумуляtors abgebildet.

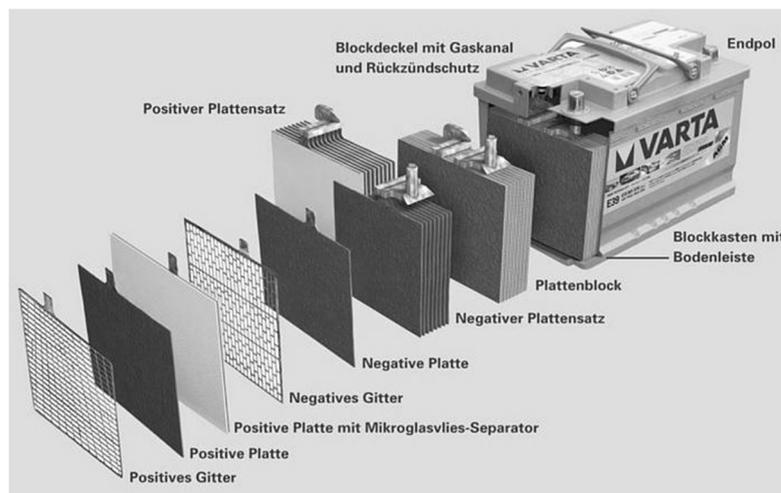


Abbildung 37: Aufbau eines Bleiakкумуляtors.¹⁴²

Massen- und Werkstoffbilanz

In den oberen Fahrzeugsegmenten werden zunehmend mehr Steuergeräte verbaut, folglich steigt auch die Gesamtmasse dieser Bauteile. Die Masse des Kabelbaums nimmt mit steigendem Segment ebenfalls zu. Die Masse der Starterbatterie beträgt nach zur Verfügung stehendem Datenmaterial aus A2Mac zwischen 14,83 und 30,22 kg.

¹⁴⁰ www.sws.co.jp/en/product/wireharness/; Zugriffsdatum: 4.4.2016.

¹⁴¹ (EUROBAT, ACEA, JAMA, KAMA & ILA, 2014), S. 8f.

¹⁴² Vgl. Abbildung (EUROBAT et al., 2014), S. 14.

In Abbildung 38 ist die Verteilung der Masse für die Bordelektronik dargestellt. Detaillierte Werte sind im Anhang B, Tabelle 59 ersichtlich. Da A2Mac keine Angaben zu den Werkstoffinhalten der Elektronikbauteile gibt, sind in Kapitel 6.3.7 repräsentative Werkstoffanteile welche aus der Literatur bezogen sind, für eine Starterbatterie und eine ECU dargestellt.

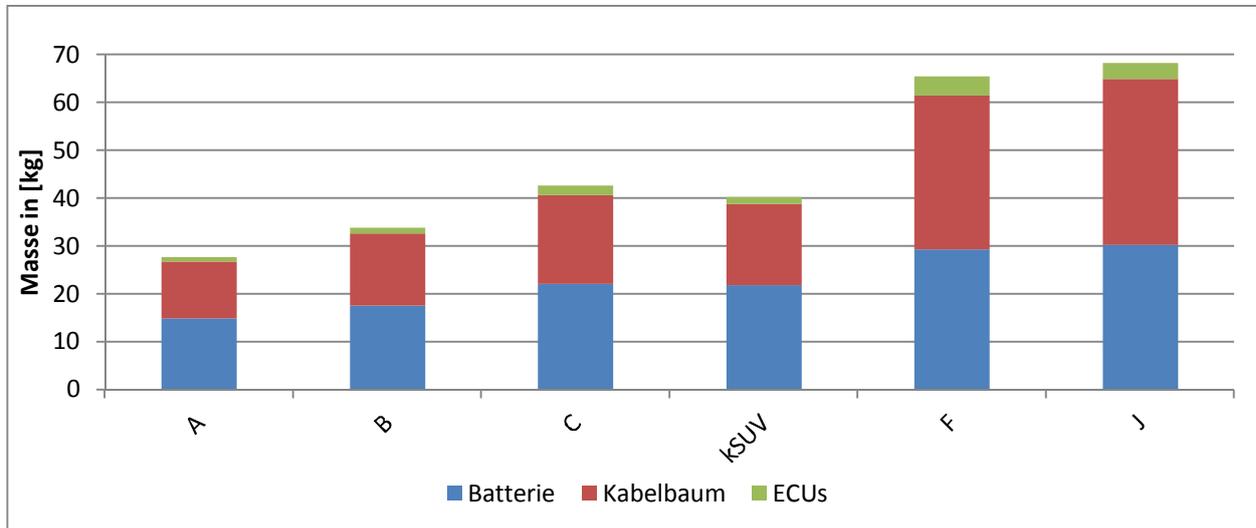


Abbildung 38: Massebilanz der Bordelektronik.¹⁴³

5.3.7 Airbags

Im Fahrzeug befinden sich verschiedene Airbags. Fahrer- und Beifahrerairbag, Kopfairbag für Vorder- und Hintersitze (Curtain-Airbags) sowie Seitenairbags in den Sitzen. In Abbildung 39 sind die verschiedenen Airbags eines modernen PKW dargestellt.



Abbildung 39: Airbags in einem modernen PKW.¹⁴⁴

¹⁴³ Eigene Darstellung.

¹⁴⁴ www.auto.de/magazin/fotos/30-jahre-airbag-nicht-nur-heisse-luft/page-4/; Zugriffsdatum 4.4.2016.

Massen- und Werkstoffbilanz

A2Mac gibt keine Angaben zur Werkstoffzusammensetzung der Airbags an, deshalb wird die Werkstoffzusammensetzung eines repräsentativen Airbags aus der Literatur verwendet (siehe Kapitel 6.3.8). Die Massen für Fahrer-, Beifahrer- und Seitenairbags wurden bereits in den Bilanzen für Cockpit, Lenkrad und den Sitzen berücksichtigt. Die Massenbilanz für die Curtain-Airbags ist in Abbildung 40 dargestellt. Detaillierte Werte sind in Anhang B (Massen- und Werkstoffbilanz untersuchter Baugruppen) aufgelistet.

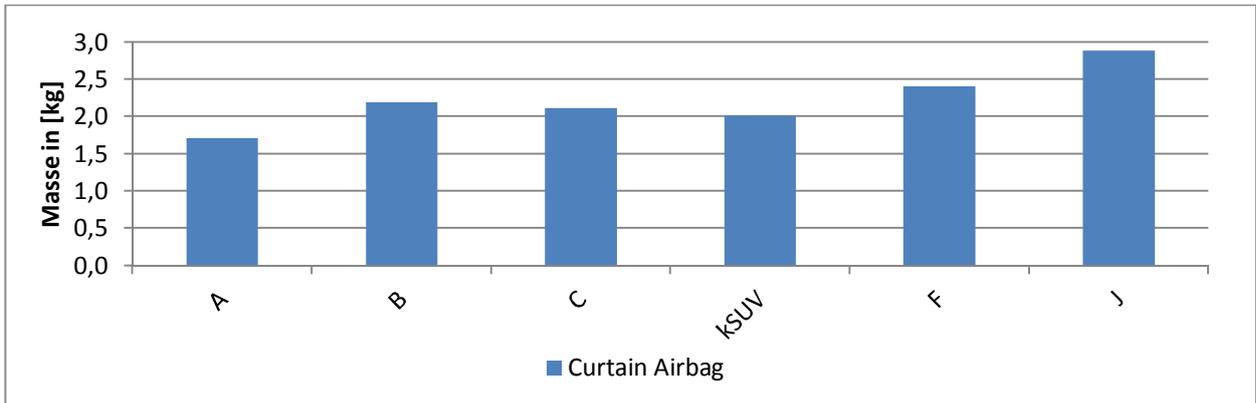


Abbildung 40: Massenbilanz der Curtain Airbags.¹⁴⁵

5.4 Zusammenfassung der durchschnittlichen Massen der untersuchten Komponenten

Zusammenfassend sind in Tabelle 9 die durchschnittlichen Massen der untersuchten Komponenten je untersuchtes Segment aufgelistet. Für das Cockpit, das Lenkrad und die Sitze sind Werte für unterschiedliche Werkstoffe in Bezug auf den Querrohrträger, dem Lenkradkern und dem Sitzbezug angegeben.

¹⁴⁵ Eigene Darstellung.

		A	B	C	kSUV	F	J
Cockpit	St	19,29	23,50	24,62	24,73	27,34	30,47
	MgAl	-	19,55	23,00	-	25,04	26,16
Lenkrad	MgAl	2,52	2,66	2,70	2,68	3,23	3,12
	Al	2,39	2,73	-	-	-	-
Fahrersitz	Stoff	18,92	21,93	22,13	21,86	30,21	27,56
	Leder	-	-	22,82	-	31,59	28,75
Beifahrersitz	Stoff	18,41	20,80	20,73	21,78	27,74	27,61
	Leder	-	-	21,46	-	29,11	28,81
Rücksitze	Stoff	17,93	21,87	23,97	26,92	32,81	41,32
	Leder	-	-	-	-	-	-
Scheiben		32,77	29,93	32,30	30,00	41,28	44,69
Motorraum		2,99	3,10	3,53	3,83	4,87	6,09
Elektronik		27,65	33,82	42,60	40,27	65,38	68,31
Curtain Airbag		1,71	2,19	2,11	2,02	2,41	2,88

Tabelle 9: Zusammenfassung der durchschnittlichen Masse in [kg].¹⁴⁶

5.5 Prüfung des Anteils erfasster Massenanteile

Aufgrund der Komplexität der Fahrzeugkomponenten Cockpit, Lenkrad und den Sitzen wurde die Massen- und Werkstoffbilanz dieser Komponenten auf die wichtigsten Bauteile beschränkt. Durch fehlende Datenlage für den Produktionsaufwand des Radiosystems wurde dieses in der Massenbilanz nicht berücksichtigt, weshalb es im Cockpit zu Ungenauigkeiten von bis zu 12 % kommt. Dadurch ergeben sich Unsicherheiten in den erfassten Massenanteilen und weiterführend ebenso in den Bilanzen für Energieverbrauch und Treibhausgasmissionen. In Tabelle 10 sind die erfassten Massenanteile der Bauteilgruppen je Segment in Prozent aufgelistet.

Komponente	A	B	C	kSUV	F	J
Cockpit	91,20	89,93	89,09	91,50	87,67	89,57
Lenkrad	97,80	96,88	99,01	96,83	96,57	100,00
Fahrersitz	97,23	95,02	97,15	98,19	94,46	96,44
Beifahrersitz	97,00	94,40	96,92	96,70	91,92	95,86
Rücksitze	93,95	95,10	95,15	94,18	94,93	95,48

Tabelle 10: Auflistung der erfassten Massenanteile in [%].¹⁴⁷

¹⁴⁶ Eigene Darstellung.

¹⁴⁷ Eigene Darstellung.

6 Durchgeführte Analysen zur Ermittlung der Produktionsdaten

Aufbauend auf den Ergebnissen der Massen- und Werkstoffbilanz werden im Folgenden allgemeine Begriffe zum Thema Energiebereitstellung und der Methodik zur Ermittlung der Produktionsdaten erklärt. Anschließend wird auf die verwendeten Werkstoffe und Bauteile, welche in Kapitel 5.3 analysiert wurden, eingegangen und die dazu recherchierten Produktionsdaten aus den verwendeten Quellen werden angegeben.

6.1 Allgemeines zur Sachbilanz der Produktion

Im Folgenden werden wichtige Begriffe zum Thema Energiebereitstellung erläutert.

Die Begriffe Primärenergie, Endenergie und Nutzenergie werden nach Schabbach /Wesselak folgend definiert:¹⁴⁸

Primärenergie: „Ist Energie in ihrem natürlichen, noch nicht technisch aufbereiteten Zustand, z.B. in Form von Kohle, Naturgas, Rohöl oder Wind.“

Endenergie: „Bezeichnet die dem Verbraucher nach Aufbereitungs- und Umwandlung in Form von Kohlebriketts, Erdgas, Benzin, Holzpellets oder Elektrizität zugeführte Energie.“

Nutzenergie: „Die Energienutzung durch den Verbraucher beinhaltet weitere Umwandlungsprozesse, die zur Nutzenergie in Form von Wärme, mechanischer Arbeit, Licht oder Kommunikation führen.“

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) wird nach VDI-Richtlinie 4600 wie folgt definiert:¹⁴⁹

Kumulierter Energieaufwand: „Der kumulierte Energieaufwand KEA gibt die Gesamtheit des primärenergetischen bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann.“

In Abbildung 41 sind die Formen der Energie dargestellt.

¹⁴⁸ (Schabbach & Wesselak, 2012), S. 29.

¹⁴⁹ (Klöpffer & Grahl, 2014), S. 78.

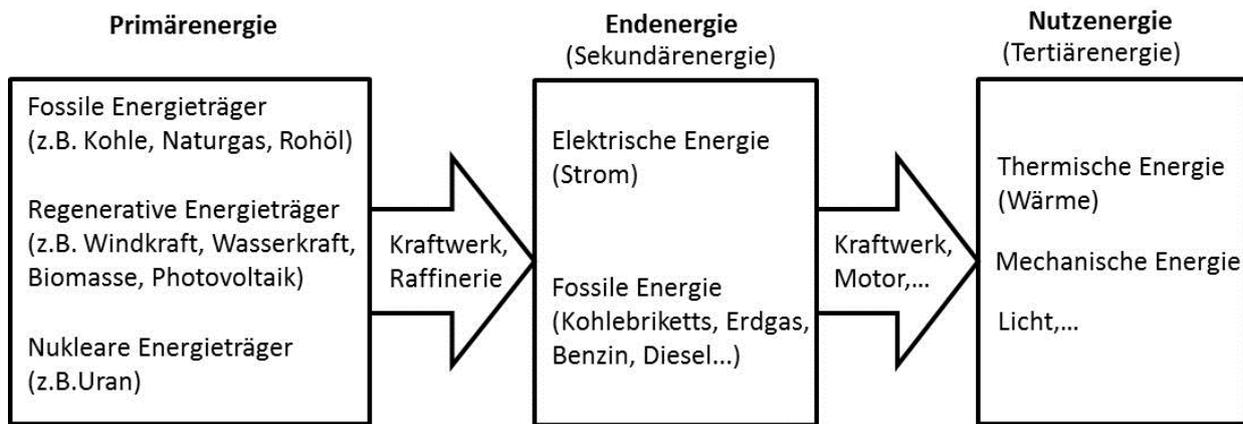


Abbildung 41: Energieformen.¹⁵⁰

6.1.1 Methodik zur Ermittlung der Produktionsdaten

Die entnommenen Daten aus den Datenbanken und der Literatur beinhalten meist die Werte für den kumulierten Energieaufwand (KEA) und die Masse der Treibhausgasemissionen (THG). Der KEA ist die Summe der nicht regenerativen Energieträger und regenerative Energieträger.¹⁵¹ Formel (1) zeigt die Formel zur Berechnung des KEA.

$$KEA = KEA_{nicht-reg} + KEA_{reg} \quad (1)$$

Mit:

KEA: kumulierter Energieaufwand in [MJ/kg]

KEA_{nicht-reg}: kumulierter Energieaufwand nicht-regenerativer Energieträger in [MJ/kg]

KEA_{reg}: kumulierter Energieaufwand regenerativer Energieträger in [MJ/kg]

Um regionale Unterschiede in der Produktion aufzeigen zu können, ist der Anteil der elektrischen Energie E_{el} in den Datenquellen gegeben oder muss zusätzlich über den Anteil am KEA ($E_{el\%}$) und dem länderspezifischen Strommix mit dem Nutzungsgrad g_{el} recherchiert werden (siehe Formel (2)).¹⁵² Der Nutzungsgrad g_{el} gibt an wie viel kWh Primärenergie in einem Land benötigt wird, um eine kWh Strom zu erzeugen (siehe Tabelle 11) und ist somit ein Maß für die Effizienz der Stromgewinnung.

$$E_{el} = \frac{KEA \cdot E_{el\%}}{g_{el}} \quad (2)$$

¹⁵⁰ Eigene Darstellung in Anlehnung an (Schabbach & Wesselak, 2012), S. 29f.

¹⁵¹ Vgl. (Klöppfer & Grahl, 2014), S. 80.

¹⁵² Vgl. (Klöppfer & Grahl, 2014), S. 89.

Mit:

KEA : kumulierter Energieaufwand in [MJ/kg]

E_{el} : elektrische Energie in [MJ/kg]

$E_{el\%}$: Anteil der elektrischen Energie am kumulierten Energieaufwand in [%]

g_{el} : Nutzungsgrad der elektrischen Energiegewinnung in [kWh_{Strom}/kWh]

Daraus ergibt sich, dass der KEA aus der Summe des KEA fossiler Energieträger und dem KEA elektrischer Energie besteht. Siehe dazu Formel (3).

$$KEA = KEA_f + E_{el} \cdot g_{el} \quad (3)$$

Mit:

KEA : kumulierter Energieaufwand in [MJ/kg]

KEA_f : kumulierter Energieaufwand fossiler Energieträger in [MJ/kg]

E_{el} : elektrische Energie in [MJ/kg]

g_{el} : Nutzungsgrad der elektrischen Energiegewinnung in [kWh/kWh_{Strom}]

Die Berechnung der gesamten Treibhausgasemissionen aus einem (Teil-) Prozess erfolgt nach Formel (4)¹⁵³. Sie ergeben sich aus der Summe der Treibhausgasemissionen durch fossile und elektrische Energiegewinnung. Der Faktor $K_{CO_{2eq-el}}$ für die Treibhausgasemissionen der elektrischen Energiegewinnung, ist wie der Nutzungsgrad g_{el} abhängig vom jeweiligen Strom-Mix eines Landes (siehe Tabelle 11). $K_{CO_{2eq-el}}$ gibt an, wie viel kg Treibhausgasemissionen durch die Erzeugung von 1kWh Strom emittiert werden.

$$THG = KEA_f \cdot K_{CO_{2eq-f}} + E_{el} \cdot K_{CO_{2eq-el}} \quad (4)$$

Mit:

THG : Masse Treibhausgasemissionen in [kgCO_{2eq}/kg]

KEA_f : kumulierter Energieaufwand fossile Energieträger in [MJ/kg]

$K_{CO_{2eq-f}}$: Emissionsfaktor für die fossile Energieträger in [kgCO_{2eq}/MJ]

E_{el} : elektrische Energie in [kWh_{Strom}/kg]

$K_{CO_{2eq-el}}$: Emissionsfaktor für die elektrische Energie in [kgCO_{2eq}/kWh_{Strom}]

¹⁵³ Formel in Anlehnung an (Zottler, 2014), S. 56.

Die Auswahl der Strommixe für die Untersuchung erfolgte nach den recherchierten Produktionsländern und zusätzlich nach folgenden Gesichtspunkten:

- Österreich: lokaler Bezug zur vorliegenden Arbeit.
- Deutschland: Ca. 37% aller PKW in der EU werden in Deutschland hergestellt.¹⁵⁴
- Europa, USA, Kanada: wegen dem hohen Anteil an produzierten PKW im globalen Vergleich.¹⁵⁵
- Norwegen: hoher Anteil an regenerativen Energieformen im Strom-Mix.¹⁵⁶
- China, Australien: hoher Anteil an fossilen Energieformen im Strom-Mix.¹⁵⁷
- Italien: aufgrund der vorhandenen Produktionsdaten für die Lederproduktion.¹⁵⁸
- Japan: aufgrund der vorhandenen Produktionsdate für die Herstellung von Kabelleiter.¹⁵⁹

Die Werte für den Nutzungsgrad g_{el} und der Faktor für die Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung $K_{CO_{2eq-el}}$ wurden aus der Datenbank GEMIS bezogen. In Tabelle 11 sind die Werte dieser Faktoren für die ausgewählten Länder aufgelistet.

Land	g_{el} [kWh/kWh _{Strom}]	$K_{CO_{2eq-el}}$ [kgCO _{2eq} /kWh _{Strom}]	GEMIS Datensatzname
Deutschland	2,678	0,587	EI-KW-Park-DE-2010
Österreich	1,815	0,223	EI-KW-Park-AT-2010
Norwegen	1,152	0,049	EI-KW-Park-NO-2010
China	2,325	0,812	EI-KW-Park-CN-2010
Australien	2,643	0,851	EI-KW-Park-AU-2010
Europa	2,492	0,362	EI-KW-Park-EU-28-2010
USA	2,776	0,663	EI-KW-Park-US-2010
Kanada	1,876	0,244	EI-KW-Park-CA-2010
Italien	2,241	0,509	EI-KW-Park-IT-2010
Japan	2,768	0,559	EI-KW-Park-JP-2010

Tabelle 11: Länderspezifische Werte für den Nutzungsgrad und die Treibhausgasemissionen elektrischer Energiegewinnung.¹⁶⁰

Der kumulierte Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen für die Herstellung von Bauteilen aus Magnesiumlegierungen, Aluminium und Kunststoffen werden mittels

¹⁵⁴ Vgl. (European Automobile Manufacturers Association, 2014), S. 41.

¹⁵⁵ Vgl. (European Automobile Manufacturers Association, 2014), S. 38.

¹⁵⁶ Vgl. wdi.worldbank.org/table/3.7; Zugriffsdatum 3.12.2015.

¹⁵⁷ Vgl. wdi.worldbank.org/table/3.7; Zugriffsdatum 3.12.2015.

¹⁵⁸ Vgl. (DANI, 2012)

¹⁵⁹ (Nichigoh Communication Electric Wire, 2012).

¹⁶⁰ Eigene Darstellung, Werte lt. GEMIS.

Formel (5) und (6) berechnet. In diesen Formeln wird das Recycling von Produktionsabfällen berücksichtigt, welche direkt und sortenrein dem Materialkreislauf wieder zugeführt werden („Closed-loop-Recycling“). Ebenfalls berücksichtigt wird die Verwendung von Sekundärwerkstoff mittels Faktor X_{RR} für den Rezyklatanteil in der Rohstoffproduktion. Siehe dazu Abbildung 42:

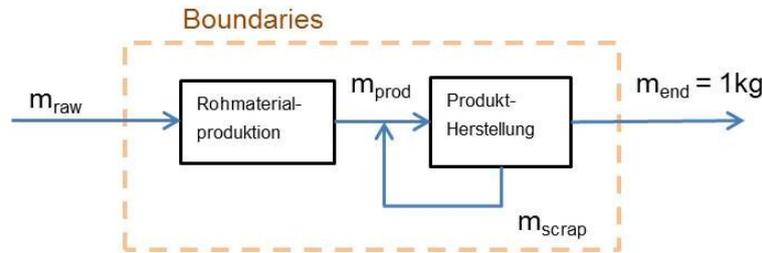


Abbildung 42: Closed-loop-Recycling.¹⁶¹

$$KEA_H = (KEA_{prim} \cdot (1 - X_{RR}) + KEA_{sek} \cdot X_{RR}) + KEA_{rec} \cdot k_{rec} + KEA_{prod} \quad (5)$$

$$THG_H = (THG_{prim} \cdot (1 - X_{RR}) + THG_{sek} \cdot X_{RR}) + THG_{rec} \cdot k_{rec} + THG_{prod} \quad (6)$$

Mit:

KEA_H : gesamter kumulierter Energieaufwand in der Herstellung in [MJ/kg]

KEA_{prim} : kumulierter Energieaufwand der Primärwerkstoffherstellung in [MJ/kg]

KEA_{sek} : kumulierter Energieaufwand der Sekundärwerkstoffherstellung in [MJ/kg]

KEA_{rec} : kumulierter Energieaufwand des „In-House“- Recyclings in [MJ/kg]

KEA_{prod} : kumulierter Energieaufwand der Produktionsschritte in [MJ/kg]

THG_H : gesamte Treibhausgasemissionen in der Herstellung in [MJ/kg]

THG_{prim} : Treibhausgasemissionen der Primärwerkstoffherstellung in [MJ/kg]

THG_{sek} : Treibhausgasemissionen der Sekundärwerkstoffherstellung in [MJ/kg]

THG_{rec} : Treibhausgasemissionen des „In-House“- Recyclings in [MJ/kg]

THG_{prod} : Treibhausgasemissionen der Produktionsschritte in [MJ/kg]

X_{RR} : Rezyklatanteil in [%]

k_{rec} : Anteil des Produktionsabfalles in [%]

Bei der Bearbeitung von Stahlblech fallen Produktionsabfälle an, die als Sekundärwerkstoff eingeschmolzen und wieder zu Stahlblechen oder für andere Verwendungen weiterverarbeitet werden (siehe Abbildung 43). In den Formeln (7) und

¹⁶¹ Eigene Darstellung.

(8) sind die Gleichungen zur Berechnung des Energieaufwandes und der Treibhausgasemissionen im gesamten Herstellungsprozess ersichtlich. Da die Rückführung der Abfälle nicht direkt erfolgt, muss zur Herstellung der Bauteile mehr Werkstoff verwendet werden. Dies wird mit der Variablen k_{roh} berücksichtigt.

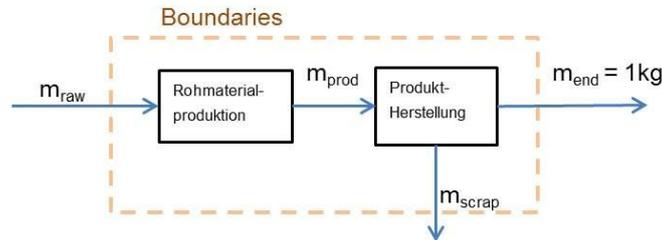


Abbildung 43: Open-loop-Recycling in der Stahlproduktion.¹⁶²

$$KEA_H = k_{roh} \cdot (KEA_{prim} \cdot (1 - X_{RR}) + KEA_{sek} \cdot X_{RR}) + KEA_{prod} \quad (7)$$

$$THG_H = k_{roh} \cdot (THG_{prim} \cdot (1 - X_{RR}) + THG_{sek} \cdot X_{RR}) + THG_{prod} \quad (8)$$

Mit:

KEA_H : gesamter kumulierter Energieaufwand in der Herstellung in [MJ/kg]

KEA_{prim} : kumulierter Energieaufwand der Primärwerkstoffherstellung in [MJ/kg]

KEA_{sek} : kumulierter Energieaufwand der Sekundärwerkstoffherstellung in [MJ/kg]

KEA_{prod} : kumulierter Energieaufwand der Produktionsschritte in [MJ/kg]

THG_H : gesamte Treibhausgasemissionen in der Herstellung in [MJ/kg]

THG_{prim} : Treibhausgasemissionen der Primärwerkstoffherstellung in [MJ/kg]

THG_{sek} : Treibhausgasemissionen der Sekundärwerkstoffherstellung in [MJ/kg]

THG_{prod} : Treibhausgasemissionen der Produktionsschritte in [MJ/kg]

X_{RR} : Rezyklatanteil in [%]

k_{roh} : Faktor Produktionsabfälle in [%]

In Anhang sind die Berechnungsschemen für den Produktionsaufwand der einzelnen Bauteile dieser Arbeit zu sehen.

Um den kumulierte Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen der Herstellung für ein Bauteil zu erhalten, werden sie mit der Masse des jeweiligen Teils multipliziert. So ergeben sich der gesamte kumulierte Energieaufwand einerseits und die Treibhausgasemissionen andererseits für das jeweilige Teil (Formel (9) und (10)).

¹⁶² Eigene Darstellung.

$$KEA_{Teil} = KEA_H \cdot m_{Teil} \quad (9)$$

$$THG_{Teil} = THG_H \cdot m_{Teil} \quad (10)$$

Mit:

KEA_{Teil} : gesamter kumulierter Energieaufwand eines Bauteils in [MJ]

KEA_H : kumulierter Energieaufwand in der Herstellung in [MJ/kg]

THG_{Teil} : gesamte Treibhausgasemissionen eines Bauteils in [MJ]

THG_H : Treibhausgasemissionen in der Herstellung in [MJ/kg]

m_{Teil} : Masse des Bauteils in [kg]

Der kumulierte Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen für die Fahrzeugkomponenten sind die Summe der kumulierten Energieaufwände und Treibhausgasemissionen der Teile (Formel (11) und (12)).

$$KEA_{Komp} = \sum KEA_{Teil} \quad (11)$$

$$THG_{Komp} = \sum THG_{Teil} \quad (12)$$

Mit:

KEA_{Komp} : gesamter kumulierter Energieaufwand der Fahrzeugkomponente in [MJ]

KEA_{Teil} : gesamter kumulierter Energieaufwand eines Bauteils in [MJ/kg]

THG_{Komp} : gesamte Treibhausgasemissionen der Fahrzeugkomponente in [MJ]

THG_{Teil} : gesamte Treibhausgasemissionen eines Bauteils in [MJ/kg]

6.2 Limitierungen, Annahmen und Untersuchungsrahmen

6.2.1 Allgemeine Annahmen

Generell ausgenommen von den Betrachtungen dieser Untersuchung sind die Herstellung der Anlagen/Fabriken zur Rohstoffgewinnung und Güterherstellung.

Für die Bewertung des Treibhausgaspotenzials wurden die klimarelevanten Emissionen CO₂, CH₄, N₂O und SF₆ in die Untersuchung miteinbezogen. Zur Darstellung regionaler Unterschiede bezüglich der Produktion von Fahrzeugkomponenten wurden

Berechnungen mittels mehrerer Datensätze zu verschiedenen regionalen Strommischen durchgeführt. Diese sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

In der Datenerhebung kommt es aufgrund verschiedener Literatur- und Datenquellen zur unterschiedlichen Daten hinsichtlich Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Produktionsparameter, wie verwendete Schutzgase oder Angaben zum Produktionsabfall. Um den Unterschied der Daten ersichtlich zu machen, wurden drei Szenarien erstellt:

- Min-Szenario,
- Max-Szenario und
- State of Art- Szenario

Anschließend werden die verschiedenen Szenarien beschrieben, Tabelle 12 gibt eine Übersicht der Parameter der verschiedenen Szenarien.

	Szenarien		
	Min	State of Art	Max
Strommix	Norwegen	lt. Recherche	Australien
Magnesiumproduktion	Pidgeon ¹⁶³	75:25 ¹⁶⁴	Pidgeon ¹⁶⁵
Schutzgas Magnesiumdruckguss	R134a	R134a	SF ₆
Abfall Stahlbearbeitung	5 %	17 %	29 %
Leistungsdichte Starterbatterie [Wh/kg]	35	45	55
X_{RR} [%] (Mg/Al/Stahl/Kunststoffe)	(100/100/100/100)	(30/28/70/10)	(0/0/0/0)

Tabelle 12: Parameter der verschiedenen Szenarien.¹⁶⁶

Im Folgenden werden die Szenarien beschrieben:

Min-Szenario

Das Min-Szenario steht für den minimalen Produktionsaufwand der Untersuchung. Der verwendete Strommix aus Norwegen für das Jahr 2010 besteht laut GEMIS¹⁶⁷ zu 93,4 % aus regenerativer Wasserkraft (Emissionsfaktor 0,049 kgCO₂eq/kWh). Für die Magnesiumgewinnung durch den Pidgeon-Prozess werden die Werte nach Ehrenberger (siehe Kapitel 6.3.1.5) verwendet. Als Schutzgas für den

¹⁶³ Werte lt. Datenquelle: (Ehrenberger, 2013), siehe Kapitel 6.3.1.5.

¹⁶⁴ State of Art- Verhältnis Pidgeon : Elektrolyse; vgl. (Dubreuil, Bushi, Das, Tharumarajah & Gong, 2010), S.8.

¹⁶⁵ Werte lt. Datenquelle: (Cherubini et al., 2008), siehe Kapitel 6.3.1.5.

¹⁶⁶ Eigene Darstellung.

¹⁶⁷ Datensatzname GEMIS: EI-KW-Park-NO-2010.

Magnesiumdruckgussprozess wird R134a verwendet. Der Wert für den Produktionsabfall des Produktionsprozesses Stanzen/Biegen (siehe Kapitel 6.3.3.5) beträgt 5 %. Die Energiedichte der Starterbatterie liegt im Min-Szenario bei 35 Wh/kg (siehe Kapitel 6.3.7.4). Für den Rezyklatanteil X_{RR} wird angenommen, dass die Herstellung der Werkstoffe Magnesium, Aluminium, Stahl und der Kunststoffe zu 100 % aus Sekundärwerkstoffen zurückgreift.

Max-Szenario

Im Max-Szenario werden die maximal möglichen Werte für den Produktionsaufwand ermittelt. Als Strommix wurde der australische Mix verwendet, da er laut GEMIS¹⁶⁸ bis zu 70 % aus Kohlekraftwerken stammt (Emissionsfaktor 0,851 kgCO₂eq/kWh). Für die Magnesiumgewinnung werden die Werte der höchsten recherchierten Daten nach Cherubini /Raugei /Ulgiati (siehe Kapitel 6.3.1.5) verwendet. Für den Magnesiumdruckgussprozess wurde das Schutzgas SF₆ angenommen. Der Produktionsabfall im Metallbearbeitungsprozess Stanzen/Biegen wird mit 29 % (siehe Kapitel 6.3.3.5) angenommen. Die Leistungsdichte der verwendeten Starterbatterie liegt bei 55 Wh/kg (siehe Kapitel 6.3.7.4). Die Werkstoffherstellung von Magnesium, Aluminium, Stahl und der Kunststoffe erfolgt ausschließlich aus Primärwerkstoffen.

State of Art-Szenario

Das State of Art-Szenario soll die aktuell vorherrschenden Gegebenheiten in der Produktion darstellen. Für den Strommix der elektrischen Energiebereitstellung wurden jene Werte für die Produktionsschritte angenommen, die in den recherchierten Quellen verwendet werden. Die Magnesiumproduktion findet zu 75 % durch den Pidgeon in China und zu 25 % durch den Elektrolyseprozess in Australien statt.¹⁶⁹ Der Rezyklatanteil für die Stahlproduktion wird mit 70 %, für die Aluminiumproduktion mit 28 % angenommen.¹⁷⁰ Der Anteil an Magnesiumrezyklat wird ähnlich dem vom Aluminium mit 30 % angenommen. Der Rezyklatanteil an Kunststoffen wird mit 10 % festgelegt.¹⁷¹ Für das Schutzgas des Magnesiumdruckgussprozesses wurde, aufgrund des Verbots von SF₆ durch die Europäische Union R134a verwendet.¹⁷² Der Produktionsabfall des Metallbearbeitungsprozesses wird als Mittelwert mit 17 % angenommen. Die Energiedichte der Starterbatterie wird als Durchschnittswert von Min- und Max-Szenario mit 45 Wh/kg¹⁷³ angenommen.

¹⁶⁸ Datensatzname GEMIS: EI-KW-Park-AU-2010.

¹⁶⁹ Vgl. (Dubreuil et al., 2010), S. 8.

¹⁷⁰ Angenommener Mittelwert nach (Geyer, 2013), S. 30.

¹⁷¹ Vgl. (Gruden, 2008), S. 316.

¹⁷² Vgl. (Europäische Union, 2008).

¹⁷³ Mittelwert Min-Max.

6.2.2 Untersuchungsrahmen der verwendeten Quellen

Wichtig für die Analyse sind die Untersuchungsrahmen der verwendeten Quellen. Diese werden in den folgenden Kapiteln vor den jeweiligen Produktionsdaten beschrieben.

Für die Untersuchungsrahmen aus dem Produktionsprozess:

- für Magnesiumherstellung siehe Kapitel 6.3.1.5,
- für Aluminiumherstellung siehe Kapitel 6.3.2.5,
- für Stahlherstellung siehe Kapitel 6.3.3.6,
- für Kunststoffherstellung siehe Kapitel 6.3.4.4,
- für Textilherstellung siehe Kapitel 6.3.5.2,
- für Glasherstellung siehe Kapitel 6.3.6.2,
- für Herstellung der Elektronikkomponenten siehe Kapitel 6.3.7 und
- für Airbag siehe Kapitel 6.3.8.1.

6.3 Ermittlung der Produktionsdaten

Um eine Abschätzung der Produktionsdaten hinsichtlich des Energiebedarf und der Treibhausgasemissionen geben zu können, wird im Folgenden auf die Rohstoffgewinnung und die Produktionsprozesse der verwendeten Werkstoffe Magnesium, Aluminium, Stahl, Kunststoffe, Textilien, Glas sowie der elektronischen Komponenten und des Airbags (lt. Werkstoffbilanzen Kapitel 5.3) eingegangen. Die verwendeten Daten der Untersuchung werden am Ende jedes Unterkapitels inklusive der herangezogenen Quellen und der Untersuchungsrahmen angegeben.

6.3.1 Magnesium

6.3.1.1 Eigenschaften

Magnesium ist zu 2 % am Aufbau der Erdkruste beteiligt. Aufgrund der großen Reaktionsfreudigkeit kommt es nicht in reinem Zustand vor sondern hauptsächlich in Form von Magnesiumverbindungen wie Carbonaten, Silikaten, Chloriden oder Sulfaten. Beispiele für Magnesiumverbindungen sind:¹⁷⁴

- Magnesiumcarbonat/Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) und
- Magnesiumchlorid (MgCl_2).

Magnesium und Magnesiumlegierungen zeichnen sich durch die geringe Dichte, die hervorragende Zerspanbarkeit und ihre guten Eigenschaften zum Gießen, Schmieden und Strangpressen aus. Durch Legierungselemente lassen sich die niedrigen

¹⁷⁴ Vgl. (Roos & Maile, 2015), S. 259.

Festigkeitswerte (Streckgrenze und Zugfestigkeit) und Korrosionsbeständigkeit von reinem Magnesium erhöhen. Die wichtigsten Legierungselemente sind Aluminium, Zink und Mangan. Einsatzgebiete für Magnesiumlegierungen im Automobilbau sind das Getriebegehäuse, die Felgen, der Querrrohrträger, die Karosserieteile und das Lenkradskelett. Durch die guten Gießeigenschaften von Magnesium werden rund 90 % aller Magnesiumbauteile als Gussbauteile hergestellt.¹⁷⁵

6.3.1.2 Primärmagnesium: Rohstoffgewinnung und Herstellung

Weltweit wurden im Jahr 2014 ca. 7,285 Mio. Tonnen von Magnesiumverbindungen abgebaut. China baut mit 67 % weltweit am meisten Magnesiumrohstoff ab.¹⁷⁶ In Abbildung 44 ist die weltweite Verteilung des Magnesiumrohstoffabbaus dargestellt.

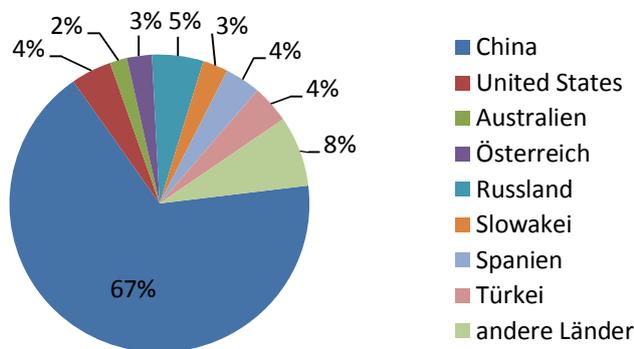


Abbildung 44: Verteilung Magnesiumrohstoffabbau weltweit 2014.¹⁷⁷

Weltweit wird der Primärmagnesiummarkt von den chinesischen Herstellern dominiert. Rund 83 % des Primärmagnesiums werden in China hergestellt. In Abbildung 45 ist die weltweite Verteilung der Primärmagnesiumproduktion abgebildet.¹⁷⁸

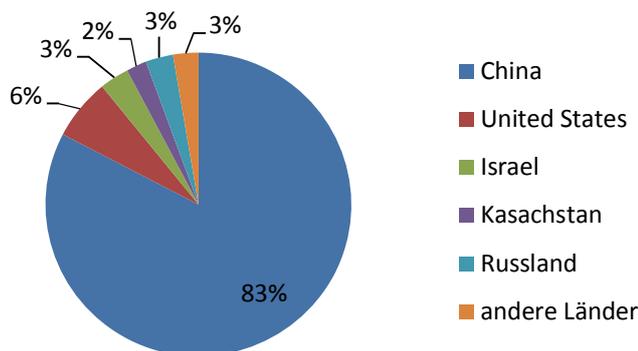


Abbildung 45: Verteilung Primärmagnesiumproduktion weltweit 2014.¹⁷⁹

¹⁷⁵ Vgl. (Roos & Maile, 2015), S. 260f.; vgl. (Braess & Ulrich, 2013), S. 507, 616 und 1054.

¹⁷⁶ Vgl. (U.S. Geological Survey, 2015), S. 96f.

¹⁷⁷ Eigene Darstellung in Anlehnung an (U.S. Geological Survey, 2015), S. 96f.

¹⁷⁸ Vgl. (Ehrenberger, 2013), S. 19.

Die Herstellung von Magnesium aus den Magnesiumrohstoffen ist energie-, ressourcenintensiv, aufwändig und verläuft in mehreren Stufen. Die Herstellung kann auf zwei verschiedenen Pfaden erfolgen. Dabei werden zwischen 70 und 80 % des weltweiten bzw. 95 % des in China hergestellten Primärmagnesiums durch den Pidgeon-Prozess hergestellt.¹⁸⁰

Pidgeon-Prozess

In Abbildung 46 ist der Pidgeon-Prozess dargestellt. Ausgangsprozess für die Magnesiumherstellung ist der Abbau von Dolomit. Nach dem Transport in ein Magnesiumwerk wird der Dolomit im „Calcination“-Prozess auf rund 1300 °C erhitzt. Der erhitzte Dolomit wird im nächsten Schritt zermahlen und mit Ferrosilicium (Reduktionsmittel) und Calciumfluorid (Katalysator) vermischt. Anschließend wird das Gemisch für den folgenden Reduktionsprozess in Briketts gepresst. Im Reduktionsprozess werden die Briketts im Reduktionsofen unter Vakuum (1–2 Pa) auf 1200 °C erhitzt. Der entstehende Magnesiumdampf kondensiert in Kristallform. Die Magnesiumkristalle beinhalten nach diesem Schritt noch bestimmte Unreinheiten. Diese werden im „Refining“-Prozess durch Zusatzstoffe beseitigt. Während des Prozesses muss die Magnesiumschmelze mit einer Schutzgasatmosphäre überdeckt sein, um das brennbare Magnesium nicht zu entflammen. Beispiele für diese Schutzgase sind Schwefelhexafluorid (SF₆) oder Tetrafluorethan (R134a).¹⁸¹

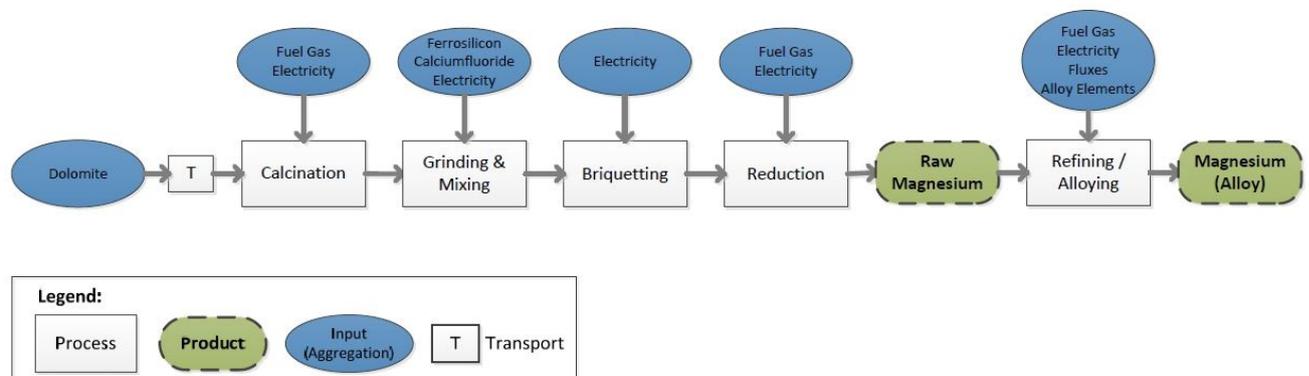


Abbildung 46: Ablauf des Pidgeon-Prozesses.¹⁸²

Elektrolyse

Bei der Elektrolyse wird Magnesium aus geschmolzenem Magnesiumchlorid hergestellt. Das Magnesiumchlorid wird aus Meerwasser, welches etwa 1,5 % Magnesium enthält, gewonnen. Das Magnesiumchlorid wird zusammen mit einem Mix aus anderen Chloriden auf ca. 700 °C erhitzt. Das entstandene Magnesium sammelt

¹⁷⁹ Eigene Darstellung in Anlehnung an (U.S. Geological Survey, 2015), S. 98f.

¹⁸⁰ Vgl. (Weißbach, 2012), S. 212f.; vgl. (Dubreuil et al., 2010), S. 8.; vgl. (WorldAutoSteel, 2010), S. 14.

¹⁸¹ Vgl. Ramakrishnan /Koltun (2004), S. 51f.; vgl. Ehrenberger (2013), S. 19f und 51f.

¹⁸² (Ehrenberger, 2013), S. 20.

sich an der Oberfläche der Schmelze.¹⁸³ In Abbildung 47 ist der Prozessverlauf der Magnesiumproduktion durch das Elektrolyseverfahren dargestellt.

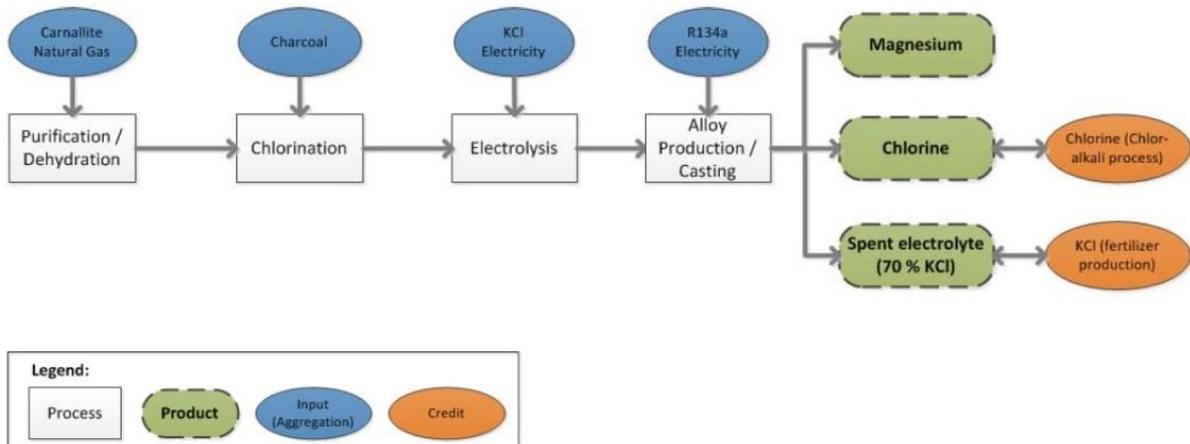


Abbildung 47: Ablauf des Elektrolyse-Prozesses.¹⁸⁴

6.3.1.3 Sekundärmagnesium

Als Sekundärmagnesium wird jenes Magnesium bezeichnet, das durch Wiederverwertung (Recycling) gewonnen wird. Im Gegensatz zum Herstellungsprozess von Primärmagnesium, welches den Prozess der Rohstoffgewinnung beinhaltet, wird Sekundärmagnesium aus Magnesiumabfällen wiederverwertet. Sekundärmagnesium benötigt in der Herstellung ca. 3–5 % des Energiebedarfs von Primärmagnesium.¹⁸⁵ Der Anteil von Sekundärmagnesium am Magnesiummarkt beträgt zwischen 20–30 %.¹⁸⁶

6.3.1.4 Magnesiumdruckguss

Wie in Kapitel 6.3.1.1 beschrieben wurde, werden ca. 90 % der Magnesiumbauteile als Druckgussbauteile gefertigt. Der Prozessablauf zur Herstellung eines Magnesiumdruckgussbauteils ist in Abbildung 48 abgebildet.

¹⁸³ Vgl. (Arnold, 2013), S. 188.

¹⁸⁴ (Ehrenberger, 2013), S. 30.

¹⁸⁵ Vgl. (Roos & Maile, 2015), S. 193.

¹⁸⁶ Vgl. (Geyer, 2013), S. 32; vgl. (Tharumarajah & Koltun, 2010), S. 1191.

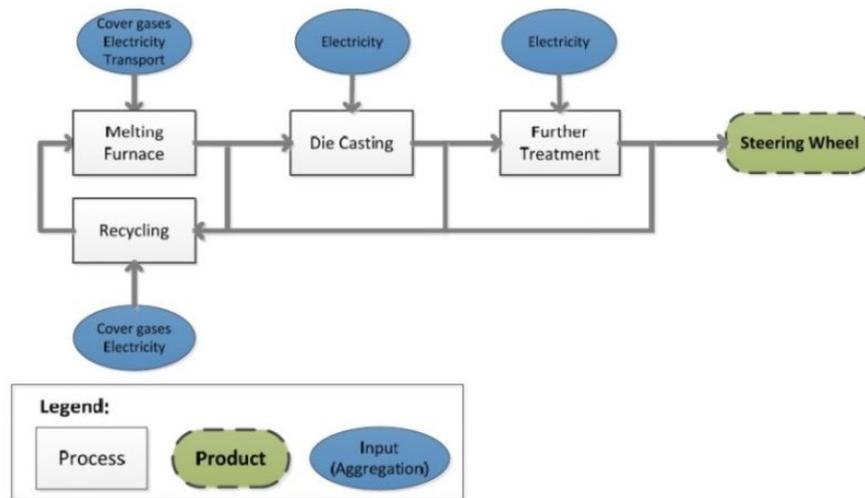


Abbildung 48: Druckgussprozess für die Herstellung Magnesiumbauteile.¹⁸⁷

Im ersten Schritt wird die Magnesiumlegierung im Schmelzofen geschmolzen. Durch eine Schutzatmosphäre (Schutzgas) wird die Oxidation der Schmelze verhindert. In einem zweiten Schritt wird die flüssige Magnesiumlegierung dem Druckgussprozess zugeführt. Die Schmelze wird hierbei unter hohem Druck in die Form gepresst. Das erstarrte Bauteil wird anschließend nachbearbeitet und gesäubert. Die Magnesiumabfälle in den einzelnen Produktionsschritten (rund 30 bis 50 % des verwendeten Materials) werden sortenrein recycelt, Ehrenberger nimmt einen Wert von 45 % an.¹⁸⁸ Eine Studie, welche von Meridian Magnesium zusammen mit Norsk-Hydro durchgeführt wurde, zeigt, dass sich Primärmagnesium und „In-house“ recyceltes Magnesium hinsichtlich ihrer Qualität nicht unterscheiden.¹⁸⁹

6.3.1.5 Produktionsdaten

Untersuchungsrahmen der verwendeten Quellen

Für die Magnesiumrohstoffgewinnung stehen mehrere Daten aus Datenbanken und der Literatur zur Verfügung. Anschließend werden die Untersuchungsrahmen der verwendeten Quellen beschrieben.

GaBi 6:

Datensatzname: Magnesium; Pidgeon process, primary production; production mix, at plant: Dieser Datensatz repräsentiert die Primärmagnesiumproduktion durch den Pidgeon-Prozess für die länderspezifische Situation in China für das Jahr 2015. Der Datensatz berücksichtigt alle relevanten Prozessschritte der

¹⁸⁷ (Ehrenberger, 2013), S. 51.

¹⁸⁸ Vgl. (Ehrenberger, 2013), S. 50f.

¹⁸⁹ (Ehrenberger, 2013), S. 46f.

Primärmagnesiumproduktion (von der Gewinnung des Dolomits bis zum Magnesiumbarren, siehe Abbildung 46) und Transportprozesse.

Ehrenberger¹⁹⁰: Dieser Report beinhaltet LCI-Daten für die Primärmagnesiumproduktion und den Magnesiumdruckgussprozess. Alle Prozessschritte der Magnesiumproduktion vom Dolomit-Abbau bis zum Rohmagnesiumbarren durch den Pidgeon- Prozess in China sind als Cradle to Gate-Prozess berücksichtigt. Die Transportprozesse sind berücksichtigt. Die Werte sind Durchschnittswerte für die Primärmagnesiumproduktion in China. Der Magnesiumdruckguss-Prozess ist als Gate to Gate Prozess für die Produktion in Europa abgebildet.

Cherubini /Raugei /Ulgiate¹⁹¹: Die Daten dieser Quelle berücksichtigen alle Schritte der Primärmagnesiumproduktion durch den Pidgeon-Prozess in China und durch den Elektrolyse-Prozess in Australien mit Transportprozessen.

Ramakrishnan /Koltun¹⁹²: Dieser Report beinhaltet Daten für den Rohstoffabbau und die Magnesiumgewinnung durch den Pidgeon-Prozess für die länderspezifische Situation in China. Die Daten berücksichtigen alle relevanten Prozessschritte der Primärmagnesiumproduktion durch den Pidgeon-Prozess und Transportprozesse.

Koltun /Tharumarajah /Ramakrishnan¹⁹³: Berücksichtigt die Prozessschritte zur Herstellung von Sekundärmagnesium. Transportprozesse sind in diesen Daten nicht berücksichtigt.

Primärmagnesium

In der Literatur finden sich verschiedene Studien, welche sich mit der Magnesiumherstellung auseinandersetzen. Abhängig vom eingesetzten Verfahren und den ortsabhängigen Gegebenheiten unterscheiden sich die Werte für den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen.¹⁹⁴ In Tabelle 13 sind die verwendeten Daten für die vorliegende Untersuchung angegeben.

¹⁹⁰ (Ehrenberger, 2013).

¹⁹¹ (Cherubini et al., 2008).

¹⁹² (Ramakrishnan & Koltun, 2004).

¹⁹³ (Koltun et al., 2014).

¹⁹⁴ (Ehrenberger, 2013), S. 39ff.

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Verfahren/Land	Quelle
358,077		34,8	Pidgeon/CN	GaBi 6
193,96	10,16	25,8	Pidgeon/CN	(Ehrenberger, 2013)
366	13,013	41,28	Pidgeon/CN	(Cherubini et al., 2008)
354,5	13,38	42,1	Pidgeon/CN	(Ramakrishnan & Koltun, 2004)
272	16,62	24,5	Elektrolyse/AU	(Cherubini et al., 2008)

Tabelle 13: Produktionsdaten für die Primärmagnesiumherstellung (CN-China, AU-Australien).¹⁹⁵

Sekundärmagnesium

Die Literatur führt nur wenige Werte für die Sekundärmagnesiumherstellung an (siehe Tabelle 14).

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Land	Quelle
25,06	2,09	1,77	US	(Koltun et al., 2014)

Tabelle 14: Produktionsdaten für die Sekundärmagnesiumherstellung (US-United States).¹⁹⁶

Magnesiumdruckguss

Für die benötigte Wärme des Schmelzprozesses kann nach Ehrenberger entweder 0,82 kWh/kg Erdgas oder 0,55 kWh/kg elektrische Energie zur Anwendung kommen. Als State of Art wird in der Druckgussindustrie elektrische Energie zum Schmelzen des Magnesiums verwendet. Der Stromverbrauch für die Druckgussmaschine und andere Peripheriegeräte beträgt 0,88kWh/kg. Je nach in Verwendung befindlichem Schutzgas werden pro kg Magnesiumlegierung 0,0011 kg SF₆ (entspricht 46,17 kgCO₂eq), 0,0022 kg SO₂ oder 0,00001 kg R134a (entspricht 0,0143 kgCO₂eq) benötigt. Das Nachbearbeiten des Druckgussteils benötigt zusätzlich 0,33 kWh/kg Strom.¹⁹⁷ In Tabelle 15 sind die LCI-Daten des Magnesiumdruckgusses dargestellt.

Für das „Inhouse“-Recycling, Rückführung der Produktionsabfälle in den Produktionsprozess, nimmt Ehrenberger den elektrischen Energieverbrauch von 0,55 kWh/kg an.¹⁹⁸

¹⁹⁵ Eigene Darstellung.

¹⁹⁶ Eigene Darstellung.

¹⁹⁷ (Ehrenberger, 2013), S. 51f.

¹⁹⁸ Vgl. (Ehrenberger, 2013), S. 52.

elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
0,55+0,88+0,33	-	-	Ehrenberger
0,55	-	„Inhouse“-Recycling	
-	47,82	SF ₆	
-	1,27	R134a	

Tabelle 15: Produktionsdaten für den Magnesiumdruckgussprozess.¹⁹⁹

6.3.2 Aluminium

6.3.2.1 Eigenschaften

Nach Sauerstoff und Silizium ist Aluminium das dritthäufigste chemische Element in der Erdkruste. Aluminium kommt in der Natur nur in Form von Oxiden oder Mischoxiden vor. Aluminium wird vor allem aus dem Rohstoff Bauxit gewonnen. Bauxit besteht aus 55–65 % Al₂O₃. Aluminium zeichnet sich durch eine geringe Dichte, gute Festigkeitseigenschaften, Umformbarkeit, Zerspanbarkeit, chemische Beständigkeit und hohe Wärmeleitfähigkeit aus. Durch Zugabe von Legierungselementen lassen sich die Eigenschaften von Aluminium verbessern. Die wichtigsten Legierungselemente sind Kupfer, Silizium, Magnesium, Zink, Mangan und Lithium.²⁰⁰

6.3.2.2 Primäraluminium: Rohstoffgewinnung und Herstellung

Im Jahr 2013 wurden weltweit 283 Mio. Tonnen Bauxit abgebaut. In Abbildung 49 ist die Verteilung der größten Bauxitabbauländer dargestellt.²⁰¹

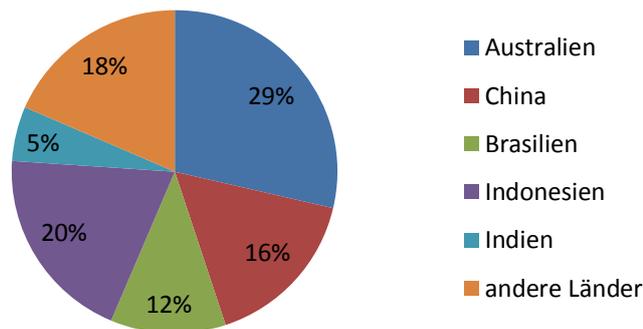


Abbildung 49: Verteilung Bauxitabbau 2013 weltweit.²⁰²

¹⁹⁹ Eigene Darstellung.

²⁰⁰ Vgl. (Roos & Maile, 2015), S. 230ff.

²⁰¹ Vgl. (U.S. Geological Survey, 2015), S. 27.

²⁰² Eigene Darstellung nach (U.S. Geological Survey, 2015), S. 27.

Die Aluminiumproduktion wird weltweit von China dominiert. Die Verteilung der größten Aluminiumhersteller ist in Abbildung 50 dargestellt. Weltweit wurden 2013 rund 47,6 Mio. Tonnen Aluminium hergestellt.²⁰³

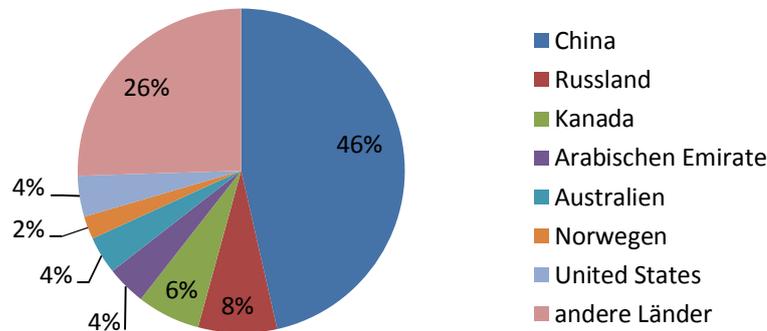


Abbildung 50: Verteilung Aluminiumproduktion 2013 weltweit.²⁰⁴

Die Herstellung von Aluminium erfordert großen Energieaufwand und erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird aus Bauxit Aluminiumoxid gewonnen. Im zweiten Schritt wird das Aluminiumoxid mit dem Prozess der Schmelzflusselektrolyse zu reinem Aluminium reduziert.²⁰⁵ Wie der Herstellungsprozess im Detail funktioniert, ist in der Arbeit von Zottler, bzw. in der Literatur Roos /Maile, Ostermann und EAA beschrieben.

6.3.2.3 Sekundäraluminium

Die Wiederverwendung von Aluminiumschrott ist aus ökologischer und ökonomischer Sicht sinnvoll. Die Herstellung von Sekundäraluminium benötigt im Vergleich zur Primäraluminiumherstellung etwa 5 % der Energie. Der Aluminiumschrott wird dabei in Neuschrott, Altschrott und Krätze unterteilt. Neuschrott, insbesondere jener der innerbetrieblich anfällt und sortenrein dem jeweiligen Prozess wieder zugeführt werden kann, wird dem ursprünglichen Verwendungszweck zugeleitet. Altschrotte und Krätzen werden zur Desoxidation in der Stahlerzeugung und für die Herstellung von Gusslegierungen verwendet. Bei entsprechender Trennung und Aufbereitung sind keine Einbußen in der Hinsicht auf die Qualität gegeben.²⁰⁶

6.3.2.4 Aluminium-Druckguss

Unter hohem Druck und hoher Geschwindigkeit wird die Aluminiumschmelze beim Druckgießen in die gewünschte Form gepresst. Der Druckgussprozess erlaubt hohe Taktzeiten von komplexen und dünnwandigen Fertigungsteilen. Wie im

²⁰³ Vgl. (U.S. Geological Survey, 2015), S. 17.

²⁰⁴ Eigene Darstellung nach (U.S. Geological Survey, 2015), S. 17.

²⁰⁵ Vgl. (Roos & Maile, 2015), S. 231f.;vgl. (Ostermann, 2014), S. 743f.

²⁰⁶ Vgl. (Roos & Maile, 2015),S. 369; vgl. (Ostermann, 2014), S. 746.

Magnesiumdruckgussprozess wird angenommen, dass 45 % der Masse des Aluminiumdruckgussprozess nicht Teil des fertigen Produktes und somit Abfall ist, der sortenrein dem Produktionsprozess zurückgeführt wird.²⁰⁷

Für die spätere Analyse des Energiebedarfs bzw. der Treibhausgasemissionen wird ein Mittelwert der verschiedenen Daten verwendet.

6.3.2.5 Produktionsdaten

Untersuchungsrahmen der verwendeten Quellen und Annahmen

EAA²⁰⁸: Der Report der European Aluminium Association gibt LCA-Daten für die Primäraluminiumherstellung an, die alle relevanten Schritte (Cradle to Gate) der Aluminiumproduktion berücksichtigen. Weiters sind LCA-Daten für die Herstellung von Sekundärmagnesium durch das Recycling von Aluminiumabfällen angegeben. Die Transportprozesse wurden ebenfalls berücksichtigt. Der Report bezieht sich räumlich auf die Gegebenheiten der Aluminiumproduktion in Europa²⁰⁹.

Primäraluminium

Die European Aluminium Association gibt LCA-Daten für die Primäraluminiumproduktion in Europa an. Der Anteil an elektrischer Energie beträgt 68 % des gesamten Energieaufwands.²¹⁰ In Tabelle 16 sind die Daten für die Primäraluminiumherstellung zu sehen.

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Verfahren/Land	Quelle
156,0	15,76	8,48	-/EU	(EAA, 2013)

Tabelle 16: Produktionsdaten für die Primäraluminiumherstellung.²¹¹

Sekundäraluminium

Tabelle 17 zeigt die recherchierten Daten für die Sekundäraluminiumherstellung.²¹²

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Verfahren/Land	Quelle
8,54	0,522	0,507	-/EU	(EAA, 2013)

Tabelle 17: Produktionsdaten für die Sekundäraluminiumherstellung.²¹³

²⁰⁷ Vgl. (Ostermann, 2014), S.428ff; vgl. (Geyer, 2013), S. 30.

²⁰⁸ (EAA, 2013), S. 38.

²⁰⁹ EU27 und Norwegen, Schweiz und Island

²¹⁰ Vgl. (EAA, 2013), S. 38.

²¹¹ Eigene Darstellung.

²¹² Vgl. (EAA, 2013), S.59.

²¹³ Eigene Darstellung.

Aluminiumdruckguss

Da die Schmelztemperatur von Aluminium (660 °C) und Magnesium (650 °C) nur eine Differenz von 10 °C aufweist, nimmt Ehrenberger für den Aluminiumdruckgussprozess dieselben Werte wie für den Magnesiumdruckgussprozess an. Für das „Inhouse“-Recycling der Produktionsabfälle wird ebenfalls angenommen, dass der Energieverbrauch aufgrund der geringen Abweichung des Schmelzpunktes 0,55 kWh/kg (siehe Kapitel 6.3.1.5) beträgt. Im Gegensatz zu Magnesium wird für das Schmelzen von Aluminium kein Schutzgas benötigt.²¹⁴

Die recherchierten und verwendeten Daten über den Druckgussprozess für Aluminiumteile sind in Tabelle 18 zu sehen.

elektr. Energie [kWh/kg]	Verfahren/ Land	Quelle
0,55+0,88+0,33	-/EU	Ehrenberger S. (2013)
0,55	„Inhouse-Recycling“	

Tabelle 18: Produktionsdaten Aluminium-Druckgussprozess.²¹⁵

6.3.3 Stahl

6.3.3.1 Eigenschaften

Eisen kommt in reiner Form in der Natur nicht vor. In chemischen Verbindungen ist Eisen jedoch sehr häufig. Diese Verbindungen werden Eisenerze genannt. Um aus Eisenerz technisch verwendbares Eisen herzustellen sind mehrere Verfahrensschritte notwendig. Die Eisenwerkstoffe werden in Stahl und Gusseisen eingeteilt. Stahl beinhaltet einen maximalen Kohlenstoffgehalt von 2 %, Gusseisen von über 2 %.²¹⁶ Weltweit führt China den Abbau von Eisenerz vor Australien an. Rund 47 % des Eisenerzes wird in China abgebaut. Gesamt wurden im Jahr 2013 rund 3110 Mio. Tonnen Eisenerz abgebaut. In Abbildung 51 ist die weltweite Verteilung des Erzabbaus im Jahr 2013 abgebildet.

²¹⁴ Vgl. (Ehrenberger, 2013), S. 52.

²¹⁵ Eigene Darstellung.

²¹⁶ Vgl. (Roos & Maile, 2015), S. 137ff.

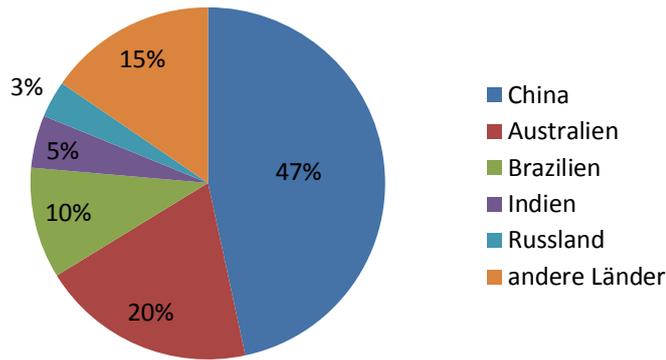


Abbildung 51: Verteilung Eisenerzabbau weltweit 2013.²¹⁷

Weltweit wurden im Jahr 2013 rund 1620 Mio. Tonnen Rohstahl hergestellt. Hauptproduzent ist China mit 55 % der Rohstahlproduktion. In Abbildung 52 ist die Verteilung der Stahlproduktion zu sehen.

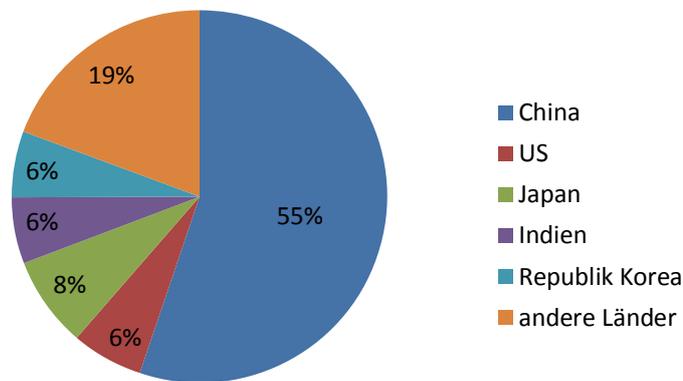


Abbildung 52: Verteilung Stahlproduktion weltweit 2013.²¹⁸

6.3.3.2 Primärstahl: Rohstoffgewinnung und Herstellung

Im Wesentlichen kommen zwei Verfahren zur Stahlerzeugung zum Einsatz. Einerseits das Blasstahlverfahren mit dem Ausgangsrohstoff Eisenerz und andererseits die Elektrostahlverfahren mit Stahlschrott als Ausgangsrohstoff.²¹⁹ Die unterschiedlichen Verfahren sind im Detail in der Arbeit von Zottler²²⁰ bzw. in der Literatur Ilschner /Singer, Roos /Maile beschrieben. Für die Karosserie und Strukturteile aus Stahl werden in der Praxis meist kaltgewalzte Stähle eingesetzt. Die Blechdicke für diese Bauteile beträgt zwischen 0,6 und 2,5 mm. Warmgewalzte Stähle finden zum Beispiel in Fahrwerkskomponenten mit Blechdicken zwischen 1,5 und 3,5 mm ihren Einsatz.²²¹

²¹⁷ Eigene Darstellung nach (U.S. Geological Survey, 2015), S. 85.

²¹⁸ Eigene Darstellung nach (U.S. Geological Survey, 2015), S. 79.

²¹⁹ Vgl. (Ilschner & Singer, 2010), S. 326f.

²²⁰ Vgl. (Zottler, 2014), S. 25ff.

²²¹ (Birkert, Haage & Straub, 2013), S. 29f.

6.3.3.3 Sekundärstahl

Für die Sekundärstahlherstellung wird das Elektrostahlverfahren eingesetzt.

6.3.3.4 Beschichtung

Um die Stahlteile vor Korrosion zu schützen, werden die Stahlrollen mit einer dünnen Schicht aus Zink überzogen. Dazu wird das Blech elektrolytisch beschichtet (engl. electroplating) oder feuerverzinkt (engl. hot dip galvanizing).²²²

6.3.3.5 Bearbeitung

Die Herstellung von Blechteilen besteht aus technischer Perspektive aus mehreren Schritten. Im ersten Schritt wird die Platine aus dem Stahlblech ausgeschnitten. Darauf folgen mehrere Fertigungsschritte wie Tiefziehen, Stanzen, Lochen, Nachformen und Beschneiden. In Abbildung 53 ist die Herstellung eines Karosserieblechteils (Verstärkung A-Säule) dargestellt. Für die spätere Analyse wird ein Bearbeitungsablauf von drei Schritten, bestehend aus Tiefziehen und Biegen/Stanzen angenommen. Laut GaBi²²³ beträgt der Produktionsabfall beim Stanzen 5 %, WorldAutoSteel²²⁴ gibt einen Wert von 29 % an. Daten zu diesen Bearbeitungsschritten sind in Tabelle 24 zusammengefasst.

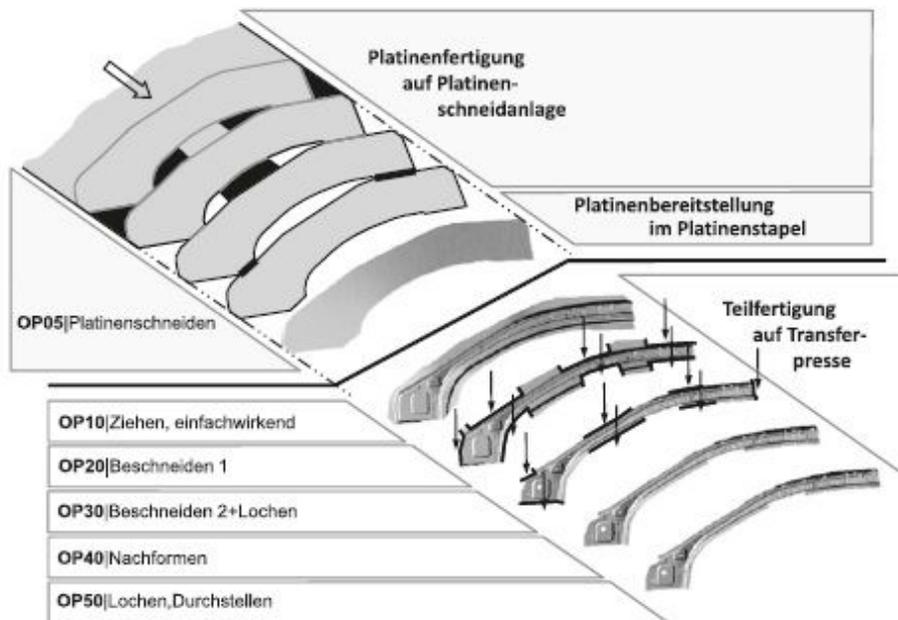


Abbildung 53: Ablaufschema Herstellung Stahlbauteil²²⁵

²²² Vgl. (Birkert et al., 2013), S. 29f; vgl. (Jandel & Meuthen, 2005), S. 49f.

²²³ GaBi Datensatz: Steel sheet stamping and bending (5% loss); technology mix; single route, at plant.

²²⁴ Vgl. (WorldAutoSteel, 2010), S. 14.

²²⁵ (Birkert et al., 2013), S. 45.

6.3.3.6 Produktionsdaten

Untersuchungsrahmen der verwendeten Quellen

GaBi6:

- Datensatzname: Steel cold rolled coil; BF route; production mix, at plant; <1,5 mm: Dieser Datensatz repräsentiert die Stahlproduktion mit den ortspezifischen Werten für Deutschland. Alle Prozessschritte vom Erzabbau bis zur Stahlrolle, sowie sämtliche Transportprozesse sind inkludiert.
- Datensatzname: Steel sheet stamping and bending (5% loss); technology mix; single route, at plant: Gate to Gate Prozess für die Metallbearbeitungsschritte Stanzen und Biegen.
- Datensatzname: Steel sheet deep drawing (multi-level); technology mix; single route, at plant: Gate to Gate Prozess für die Metallbearbeitung durch den Tiefziehenprozess für typische Tiefziehteile in der Automobilindustrie.
- Datensatzname: Steel sheet EG; BF route - Flat C-steel; production mix, at plant; Steel sheet 1.5mm EG (0.01mm Zn; 2sides): Cradle to Gate Datensatz für die Produktion von elektroverzinkten Stahlblech in Deutschland. Die Daten berücksichtigen die Rohstoffgewinnung, die Werkstoffproduktion, den Verzinkungsprozess und alle Transportprozesse.
- Datensatzname: Steel sheet HDG; BF route - Flat C-steel; production mix, at plant; Steel sheet 1.5mm HDG (0.02mm Zn; 2sides): Der Datensatz beinhaltet die Herstellung von feuerverzinkten Stahlblech in einem Cradle to Gate Prozess. Die Daten berücksichtigen die Rohstoffgewinnung, die Werkstoffproduktion, den Verzinkungsprozess und die Transportprozesse.

GEMIS:

- Datensatzname: Metall\Stahl-Coils-Kaltwalz-EU-2005, Metall\Stahl-Profil-EU-2005: Die Werte der Datensätze repräsentieren die durchschnittliche Stahlproduktion in der EU.

(Geyer, 2013): Der Report von Geyer verwendet die Daten der World Steel Association. Diese Werte berücksichtigen Transport- und Herstellungsprozesse.

Primärstahlherstellung

In Tabelle 19 sind die recherchierten und verwendeten Produktionsdaten für die Primärstahlherstellung angegeben. Der Anteil an elektrischer Energie am Energiebedarf wurde mit 18 % angenommen.²²⁶

²²⁶ Vgl. (Zottler, 2014), S. 59.

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
23,64	0,91	1,98	Steel cold rolled coil; BF route; production mix, at plant; <1,5 mm/DE	GaBi6
21,5	0,85	2,29	Metall\Stahl-Coils-Kaltwalz-EU-2005	GEMIS
12,06	0,60	1,16	Metall\Stahl-Profil-EU-2005	GEMIS

Tabelle 19: Produktionsdaten für die Primärstahlherstellung.²²⁷

Sekundärstahlherstellung

In Tabelle 20 sind die Produktionsdaten für die Sekundärstahlherstellung aufgelistet. Das Institut für Industrielle Produktivität gibt einen elektrischen Energieverbrauch der Sekundärstahlherstellung von 350kWh/t Stahl an.²²⁸

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
6,35	-	0,507	-	(Geyer, 2013)
-	0,35	-	-	²²⁹

Tabelle 20: Daten für die Sekundärstahlherstellung.²³⁰

Stahlbeschichtung

Um Prozessdaten für den Beschichtungsprozess der Stahlteile zu erhalten, werden Daten für elektrisch verzinktes und feuerverzinktes Stahlbleche aus der Datenbank GaBi6 entnommen und mit dem GaBi-Datensatz der Rohstahlblechherstellung (Tabelle 19) verglichen. In Tabelle 21 sind die recherchierten Daten für die verzinkten Stahlbleche zu sehen.

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
26,68	-	2,2	Steel sheet (hot dip galvanized) 1,5mm; 0,02mm Zn; 2 Sides/DE	GaBi6
26,85	-	2,21	Steel sheet (electrogalvanized) 1,5mm; 0,01mm Zn; 2 Sides/DE	GaBi6

Tabelle 21: Produktionsdaten für verzinktes Stahlblech.²³¹²²⁷ Eigene Darstellung.²²⁸ Vgl. <http://ietd.iipnetwork.org/content/electric-arc-furnace>; Zugriffsdatum: 12.12.2015.²²⁹ Vgl. <http://ietd.iipnetwork.org/content/electric-arc-furnace>; Zugriffsdatum: 12.12.2015.²³⁰ Eigene Darstellung.

Für die Prozessdaten der Stahlblechbeschichtung wird angenommen, dass die Differenz der Daten aus den Datensätzen der verzinkten Stahlbleche (Tabelle 21) und dem Datensatz des Rohstahlblechs (Tabelle 19), dem Beschichtungsprozess entspricht. In Tabelle 22 sind die Prozessdaten der Stahlblechbeschichtung ersichtlich.

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.
3,13	-	0,225	eigene Berechnung

Tabelle 22: Daten für den Beschichtungsprozess.²³²

Die ECCA gibt einen elektrischen Energieverbrauch für die Beschichtung von Stahlblech mit 0,32 kWh/m² an.²³³ Bei einer angenommenen Blechstärke von 1,5mm beträgt der elektrische Energieverbrauch 0,027 kWh/kg Blech. In Tabelle 23 sind die Daten für den elektrischen Energieverbrauch des Beschichtungsprozess angegeben.

elektr. Energie [kWh/m ²]	elektr. Energie [kWh/kg]	Quelle
0,32	0,027	(ECCA, 2012)

Tabelle 23: Elektrischer Energieverbrauch des Beschichtungsprozesses.²³⁴

Metallbearbeitung

In Tabelle 24 sind die recherchierten Daten für die Stahlblechbearbeitungsschritte zu sehen.

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
-	0,05	-	Steel sheet stamping and bending/GLO	GaBi6
2,98	0,28	0,18	Steel Sheet Deep Drawing/DE	GaBi6

Tabelle 24: Daten für die Metallbearbeitung.²³⁵

Laut GaBi-Datensätze fallen beim Stanzprozess zwischen 5 und 29 % und beim Tiefziehen 60 % Stahlschrott an.

²³¹ Eigene Darstellung.

²³² Eigene Darstellung.

²³³ Vgl. (ECCA, 2012), S. 21.

²³⁴ Eigene Darstellung.

²³⁵ Eigene Darstellung.

6.3.4 Kunststoffe

Kunststoffe sind auf Erdöl-, Erdgas- oder Kohlebasis hergestellte, hochmolekulare Polymer-Werkstoffe. Technische Kunststoffe lassen sich in drei Gruppen einteilen.²³⁶

- Thermoplaste,
- Duroplaste und
- Elastomere.

In dieser Arbeit sind vor allem Thermoplast wie Polypropylen (PP), Polyethylen (PE), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polyvinylchlorid (PVC) und Polyamid (PA) von Relevanz. Wie die durchgeführte Werkstoffanalyse (siehe Kapitel 5) zeigt, finden sich diese vor allem im Interieur des Fahrzeuges wieder. Polyurethan (PUR) wird in Form von PUR-Schaum für die Sitzpolsterung verwendet. Anschließend werden die Eigenschaften der genannten Kunststoffe erläutert und auf die Rohstoffgewinnung und Kunststoffherstellung eingegangen.

6.3.4.1 Eigenschaften

Die wichtigsten Eigenschaften der verwendeten Thermoplaste sind in Tabelle 25 aufgelistet.

Werkstoff	Dichte [kg/dm ³]	max. Einsatztemperatur [°C]	E-Modul [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]
PP	0,91	100	900–1500	25–40
PE	0,94	90	100–1200	5–40
ABS	1,06	85	1900–2700	32–56
PVC	1,39	65	2500–4000	25–70
PA	1,02	80	1100–1600	50–55

Tabelle 25: Eigenschaften der verwendeten Thermoplaste.²³⁷

6.3.4.2 Rohstoffgewinnung und Herstellung

Die Kunststoffe werden synthetisch durch Polymerisation hergestellt. Jährlich werden rund 4 % des geförderten Erdöls für die Kunststoffherstellung verwendet. Abhängig von der Bildungsreaktion unterscheidet man folgende Verfahren zur Herstellung von Kunststoffen:²³⁸

- Kondensationspolymerisation
- Additionspolymerisation
 - Kettenreaktion

²³⁶ Vgl. (Hellerich et al., 2010), S. 3

²³⁷ Eigene Darstellung nach (Roos & Maile, 2015), S. 278f.

²³⁸ Vgl. (Domininghaus, 2012), S. 13.

○ Stufenreaktion

Durch diese Verfahren entstehen Vorprodukte, wie Pulver oder Granulate, die später zu Formteilen weiterverarbeitet werden.²³⁹

Das Spritzgussverfahren wird zur Verarbeitung der Thermoplast-Vorprodukte zu Formteilen, welche im Automobilbau Anwendung finden, verwendet. Ein detaillierter Prozessablauf des Spritzgießens wird in Domininghaus²⁴⁰ und Hellerich /Harsch /Baur²⁴¹ näher beschrieben. Mit der Zeit hat sich eine Vielfalt von verschiedenen Spritzgusstechniken entwickelt, welche in der heutigen Zeit zum Einsatz kommen. Für die vorliegende Arbeit wird angenommen, dass die Bauteile im Allgemeinen als Spritzgussbauteile gefertigt werden.

Zur Herstellung von PUR-Schaum wird das „Reaction-Injection-Molding“ Verfahren (RIM) verwendet. PUR-Schaum entsteht bei der Reaktion von Polyisocyanaten mit Polyolen. Die Eigenschaften des PUR-Schaums hängen dabei vom verwendeten Polyisocyanat ab.²⁴²

6.3.4.3 Rezyklat

Produktionsabfälle wie Angüsse oder Butzen, werden nach dem Stand der Technik wieder dem Herstellungsprozess zugeführt. Für Thermoplaste gibt es zwei werkstoffliche Verwertungsmöglichkeiten:²⁴³

- regranulieren (100 % Rezyklat) oder
- compoundieren (Mischung des Rezyklat mit Neuware).

Das sortenreine Recycling von Thermoplasten ist ohne Probleme möglich. Allerdings muss beachtet werden, dass bei jedem Wiederaufbereitungsschritt die Qualität des Kunststoffes abnimmt. Rezyklate werden deshalb für Produkte eingesetzt, welche keine hohen Festigkeitsansprüche stellen.²⁴⁴ In Abbildung 54 sind die Fahrzeugteile eines VW Golfs abgebildet, welche aus Rezyklat gefertigt sind.

²³⁹ Vgl. (Schröder, 2014), S. 3.

²⁴⁰ Vgl. (Domininghaus, 2012), S. 78.

²⁴¹ (Hellerich et al., 2010)

²⁴² Vgl. http://www.chemie.de/lexikon/Polyurethan.html#_note-wkaiser/; Zugriffsdatum: 15.10.2015.

²⁴³ Vgl. (Domininghaus, 2012), S. 107.

²⁴⁴ Vgl. (Roos & Maile, 2015), S. 72.

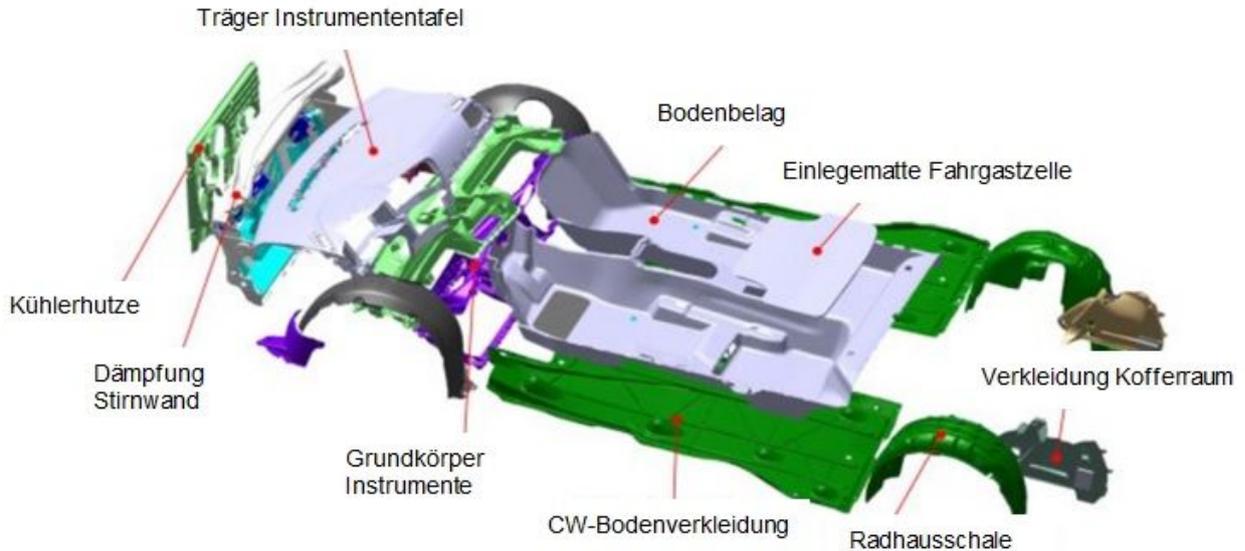


Abbildung 54: Fahrzeugbauteile aus Rezyklat im VW Golf.²⁴⁵

Um Spritzgussbauteile ohne deutliche Qualitätseinbußen zu fertigen, gilt eine Toleranzgrenze von 5 % Rezyklatanteil. Veränderungen der Werkstoffeigenschaften werden bei Anteilen zwischen 5 und 25 % immer deutlicher.²⁴⁶

Bei einer vom Automobilkonzern Volkswagen durchgeführten Analyse wurde der Rezyklatanteil in Fahrzeugbauteilen ermittelt. Einzelne Bauteile, wie beispielsweise die Radhausschale, bestehen zu 100 % aus Rezyklat.²⁴⁷

In Summe beträgt der Kunststoffrezyklatanteil in einem modernen Fahrzeug zurzeit 10 %. Ziel ist es den Anteil auf 15 % zu steigern.²⁴⁸

In den Tabelle 26 bis Tabelle 32 sind die Daten für die verschiedenen Thermoplaste und PUR, sowie des Spritzgussprozesses für die Weiterverarbeitung des Granulates zusammengefasst.

6.3.4.4 Produktionsdaten

Untersuchungsrahmen der verwendeten Quellen

GaBi6:

Datensatznamen:

- Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Granulate (ABS) Mix; technology mix; production mix, at plant.

²⁴⁵ <http://www.volkswagen.de/de/markenwelt/verantwortung/recycling.html>, Zugriffsdatum: 15.2.2016

²⁴⁶ Vgl. (Hellerich et al., 2010), S. 58

²⁴⁷ Vgl. <http://www.volkswagen.de/de/markenwelt/verantwortung/recycling.html>, Zugriffsdatum: 15.2.2016

²⁴⁸ Vgl. (Gruden, 2008), S. 316.

- Polypropylene granulate (PP) mix; technology mix; consumption mix, to consumer.
- Polyethylene High Density Granulate (HDPE/PE-HD); Polymerisation of ethylene; production mix, at plant.
- Polyvinylchloride granulate (Suspension, S-PVC); polymerisation of vinyl chloride; production mix, at plant.

Die Datensätze repräsentierten die Herstellung (Cradle to Gate) von ABS-, PP, PE-HD- und PVC-Granulat für die länderspezifische Situation in Deutschland mit allen relevanten Prozessschritten, von der Gewinnung der Rohstoffe bis zum Kunststoffgranulat, sowie der Transportprozessen.

Datensatzname:

- Granulator; technology mix; production mix, at plant; 30- 1500 kg/h throughput.

Dieser Datensatz beinhaltet Daten für das Regranulieren der Kunststoffteile (Gate to Gate) in Deutschland. Alle relevanten Prozessschritte und bekannten Transportprozessen wurden berücksichtigt.

GREET2014:

Diese Datenbank gibt Daten für die Herstellung (Cradle to Gate) und die Verarbeitung mittels Injection-Molding-Prozess (Gate to Gate) für verwendet Kunststoffe (ABS, PA, PP, PE-HD, PVC und PUR) in Nordamerika an. Alle relevanten Herstellungsprozesse sind berücksichtigt. Die Werte für den Spritzgussprozess sind aufgrund der unterschiedlichen Schmelztemperaturen der Thermoplaste unterschiedlich hoch.

Plastics Europe:

Quellen der Daten: ABS: (PlasticsEurope, 2015a); PA: (PlasticsEurope, 2014a); PP: (PlasticsEurope, 2014b); HD-PE: (PlasticsEurope, 2014c); PVC: (PlasticsEurope, 2015b); PUR: PlasticsEurope (2005a),(PlasticsEurope, 2005a).

Die Association of Plastics Manufacturers gibt Daten in ökologischen Produkterklärungen für Kunststoffe welche in Europa herstellt werden an (Cradle to Gate). Die Daten berücksichtigen alle relevanten Herstellungsschritte und Transportprozesse.

ABS

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
89,56	-	3,17	Granulat/DE	GaBi6
92,31	-	3,6	US	GREET2014
92,18	0,29	3,1	EU	(PlasticsEurope, 2015a)
19,61	0,8	1,0	Inje. mold ²⁴⁹ /US	GREET2014

Tabelle 26: Produktionsdaten für ABS.²⁵⁰

PA

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
127,8	-	7,0	US	GREET2014
139,51	1,11	6,4	EU	(PlasticsEurope, 2014a)
24,54	0,8	1,48	Inje. mold /US	GREET2014

Tabelle 27: Produktionsdaten für PA.²⁵¹

PP

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
69,97	-	1,73	Granulat/DE	GaBi6
65,47	-	1,91	US	GREET2014
77,9	0,35	1,63	EU	(PlasticsEurope, 2014b)
15,88	0,8	0,77	Inje. mold /US	GREET2014

Tabelle 28: Produktionsdaten für PP.²⁵²

HDPE/PE

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
69,52	-	1,6	Granulat/DE	GaBi6
69,04	-	2,12	US	GREET2014
80,2	0,43	1,8	EU	(PlasticsEurope, 2014c)
19,09	2,0	1,32	Inje. mold./US	GREET2014

Tabelle 29: Produktionsdaten für PE.²⁵³

²⁴⁹ Injection Molding (Spritzguss).

²⁵⁰ Eigene Darstellung.

²⁵¹ Eigene Darstellung.

²⁵² Eigene Darstellung.

PVC

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
57,31	-	2,13	Granulat/DE	GaBi6
52,08	-	2,38	US	GREET2014
60,7	0,51	2,0	EU	(PlasticsEurope, 2015b)
12,04	1,23	0,85	Inje. mold /US	GREET2014

Tabelle 30: Produktionsdaten für PVC.²⁵⁴

PUR

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
102,14	6,5	4,7	flexible foam/EU	(PlasticsEurope, 2005b)
101,48	6,0	3,5	rigid foam/EU	(PlasticsEurope, 2005a)

Tabelle 31: Produktionsdaten für PUR.²⁵⁵

Regranulierung

Für das Regranulieren der Kunststoffe wird ausschließlich elektrische Energie verwendet.

elektr. Energie [kWh/m ²]	Anmerk.	Quelle
0,092	DE	GaBi6

Tabelle 32: Elektrischer Energieverbrauch Regranulat.²⁵⁶

6.3.5 Textilien

Laut Literatur Fung & Hardcastle befinden sich 20 kg Textilien in einem durchschnittlichen Fahrzeug. Dabei entfallen auf die Sitzbezüge 3,5 kg, auf Teppiche 4,5 kg und jeweils 6 kg auf andere Interieurteile und Glasfaserverbundteile. Die wichtigsten Anforderungen an Textilien für Sitzbezüge im Automobilbau sind ein hoher Verschleißwiderstand und UV-Beständigkeit. Als Faser für die Stoffe kommen verschiedene Werkstoffe in Frage, z.B. Naturfasern wie Baumwolle oder synthetische Fasern wie Polypropylen, Nylon oder Polyester. In den letzten Jahren hat sich Polyester

²⁵³ Eigene Darstellung.

²⁵⁴ Eigene Darstellung.

²⁵⁵ Eigene Darstellung.

²⁵⁶ Eigene Darstellung.

als Faserwerkstoff für Sitzbezüge durchgesetzt. Zu den oben genannten Anforderungen hat Polyester als Faserwerkstoff zusätzlich eine hohe Reißfestigkeit und Elastizität. Es wird weltweit in 90 % aller hergestellten Autositze verwendet. Zusätzlich zu den Faserstoffen kommt in den höheren Fahrzeugsegmenten Leder als Sitzbezug zum Einsatz.²⁵⁷

6.3.5.1 Rohstoffgewinnung und Herstellung

Die Produktion von Baumwolltextilien besteht aus sechs Prozessschritten. Die ersten Schritte sind der Anbau und die Weiterverarbeitung der Baumwolle. Im nächsten Schritt wird die Baumwolle zu einem Garn gesponnen. Anschließend wird das Garn durch Weben oder Stricken zu Stoff verarbeitet. Bis zum fertigen Rohtextil muss es noch weiter behandelt, gefärbt und getrocknet werden.²⁵⁸

Ausgangsstoff für die Herstellung von synthetischen Textilien ist Kunststoffgranulat. Dieses Kunststoffgranulat wird zu dünnen Fasern verarbeitet und gesponnen. Anschließend werden die Fasern texturiert um sie flexibler, weicher und in der Haptik optimal zu gestalten. Im nächsten Schritt werden die Fasern, wie bei der Baumwolltextilproduktion, durch Weben oder Stricken zu Stoff verarbeitet. Im Weiteren folgen eine Wärmebehandlung und das Einfärben der Stoffe zum fertigen Rohtextil.²⁵⁹

Die Herstellung von Leder beinhaltet mehrere Arbeitsschritte, beginnend mit der Aufzucht und dem Schlachten der Rinder. In der Gerberei folgt eine komplexe Abfolge an chemischen Reaktionen und mechanischen Bearbeitungsschritte, durch welche die Häute zu fertigem Leder verarbeitet werden. Der Prozess des Gerbens gibt der Lederhaut die nötige Stabilität und ist der wichtigste Prozessschritt in der Lederherstellung. Gleichzeitig ist dieser aber auch hauptverantwortlich für den Ressourcenverbrauch (Energie, Wasser und Chemikalien) und die Luftemissionen. Die Verwendung der Chemikalien verursacht Giftstoffe im Abwasser der Gerberei.²⁶⁰

6.3.5.2 Produktionsdaten

Untersuchungsrahmen der verwendeten Quellen

(van der Velden, Patel & Vogtländer, 2014):

Die Daten berücksichtigen die Herstellung von Woll- und synthetischen Fasern in einem Cradle to Gate Prozess. Alle Produktionsschritte und Transportprozesse wurden hier berücksichtigt. Die Weiterverarbeitung der Fasern zu Textilstoffen erfolgt in Gate to

²⁵⁷ (Fung & Hardcastle, 2001), S. 9ff.

²⁵⁸ Vgl. (van der Velden et al., 2014), S. 334ff.

²⁵⁹ Vgl. (van der Velden et al., 2014), S. 334ff.

²⁶⁰ Vgl. (Joseph & Nithya, 2009), S. 676ff.

Gate Prozessen, hier werden Transportprozesse nicht berücksichtigt. Als Strommix wurde der Mix für Europa gewählt.

(DANI, 2012):

Die ökologische Produkterklärung von DANI beinhaltet Daten für die Produktion von Leder in Italien. Sie berücksichtigt alle Prozessschritte von der Aufzucht der Rinder bis zum fertigen Rohleder (Cradle to Gate). In den Werten sind die Transportprozesse berücksichtigt.

GaBi6: Cutting and Sewing: Für die Verarbeitung der Stoffe zu Sitzbezügen (Gate to Gate) wurde dieser Datensatz von GaBi entnommen. Die Daten orientieren sich an durchschnittlichen Industriedaten.

Textilproduktion

Die Daten für die Textilproduktion aus natürlichen Fasern und aus synthetisch hergestellten Fasern sind einer Vergleichsstudie entnommen. In dieser Studie werden verschiedene Textilwerkstoffe als Funktion der Feinheit (dtex)²⁶¹ der Fasern untersucht, da die Daten der Rohtextilproduktion stark von der Feinheit der Fasern abhängig sind.²⁶² Für die Verarbeitung von Baumwollgarn wurden 150 dtex und für die Herstellung synthetischen Fasern 70 dtex angenommen. Die verwendeten Daten für die Rohstoffproduktion und die Weiterverarbeitung zum fertigen Rohtextil sind in Tabelle 33 und Tabelle 34 aufgelistet.

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
50,4	0,91	3,75	Cotton 150dtex/EU	(van der Velden et al., 2014)
78,4	0,43	2,7	PET 70dtex/EU	
129,7	1,11	8,64	PA 70dtex/EU	
70,04	0,35	1,73	PP 70dtex/EU	

Tabelle 33: Produktionsdaten der Textil-Rohstoffproduktion.²⁶³

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
206,9	17,1	9,64	Cotton 150dtex/EU	(van der Velden et al., 2014)
278,6	23,8	12,98	PET 70dtex/EU	
278,6	23,8	12,98	PA 70dtex/EU	
278,6	23,8	12,98	PP 70dtex/EU	

Tabelle 34: Produktionsdaten der Rohtextilproduktion.²⁶⁴

²⁶¹ decitex = Masse in Gramm pro 10000m

²⁶² Vgl. (van der Velden et al., 2014).

²⁶³ Eigene Darstellung.

Lederproduktion

Die Daten für die Lederproduktion sind einer Environmental Product Declaration (EPD) des Unternehmens DANI (Italien) entnommen. In Tabelle 35 sind die Daten der Lederproduktion aufgelistet. Um die Werte auf die Einheiten [MJ/kg], [kWh/kg] bzw. [kgCO₂eq] umrechnen zu können, wird die Masse von 1 m² Rohleder benötigt. DANI gibt diesen Wert mit 3,93 kg/m² an.

KEA [MJ/m ²]	elektr. Energie [kWh/m ²]	THG [kgCO ₂ eq/m ²]	Anmerk.	Quelle
25,88	-	12,15	Rohleder/ IT	(DANI, 2012)
31,21	2,8	1,776	Verarbeitung/ IT	

Tabelle 35: Produktionsdaten der Lederproduktion.²⁶⁵

Textilverarbeitung

Für die Verarbeitung der Rohtextilien zu fertigen Teilen müssen diese noch geschnitten und vernäht werden. In Tabelle 36 sind die Daten für diesen Schritt zu sehen. Wie oben erwähnt wird, müssen diese Werte ebenfalls umgerechnet werden. Für die Textilien der Fahrzeugsitze wird eine Masse von 0,4 kg/m² angenommen.²⁶⁶

elektr. Energie [kWh/m ²]	Anmerk.	Quelle
1,53	Cutting and Sewing	GaBi6

Tabelle 36: LCI-Daten der Verarbeitungsschritt Schneiden und Nähen.²⁶⁷

6.3.6 Glas

In diesem Kapitel wird die Herstellung von Einscheiben- und Verbundscheibensicherheitsglas beschrieben.

6.3.6.1 Rohstoffgewinnung und Herstellung

Glas entsteht als Ergebnis eines Schmelzprozesses von verschiedenen, vermischten Ausgangsrohstoffen und hat eine Dichte von rund 2500 kg/m³. Die Rohstoffe werden oberhalb von 1400 °C in einem Glasschmelzofen zu homogenem Glas geschmolzen. Die drei Hauptrohstoffe für die Glasherstellung sind Quarzsand, Natriumcarbonat (Soda) und Erdalkalioxide (in Form von Carbonaten wie Kalk oder Dolomit). Das Zugeben von Glasscherben wirkt schmelzbeschleunigend sowie energiesparend und

²⁶⁴ Eigene Darstellung.

²⁶⁵ Eigene Darstellung.

²⁶⁶ Vgl. (Mogahzy, 2009), S. 470.

²⁶⁷ Eigene Darstellung.

wirkt sich positiv auf die CO₂-Emissionen im Herstellungsprozess aus. Bei reiner Glasschmelze aus Recyclingscherben wird rund 25 % weniger Energie benötigt. Ein weiterer Vorteil ist die Einsparung der Ausgangsressourcen.²⁶⁸

Wie bereits in Kapitel 5.3.4 erwähnt wurde, sind Flachglasscheiben das Ausgangsprodukt für die Herstellung von Einscheiben- und Verbundsicherheitsglas. Dieses Flachglas wird im Floatverfahren hergestellt. Dabei fließt die Glasschmelze aus dem Schmelzofen über einen Lippenstein auf ein flüssiges Zinnbad. In einer Atmosphäre aus Stickstoff und Wasserstoff, welche die Reaktion von Zinn mit Luftsauerstoff verhindert, breitet sich die Glasschmelze auf dem Zinn aus und erstarrt. Anschließend wird das Glasband im Kühllofen spannungsarm gekühlt, auf Fehler kontrolliert, geschnitten und gestapelt.²⁶⁹ In Abbildung 55 ist das Floatverfahren schematisch abgebildet.

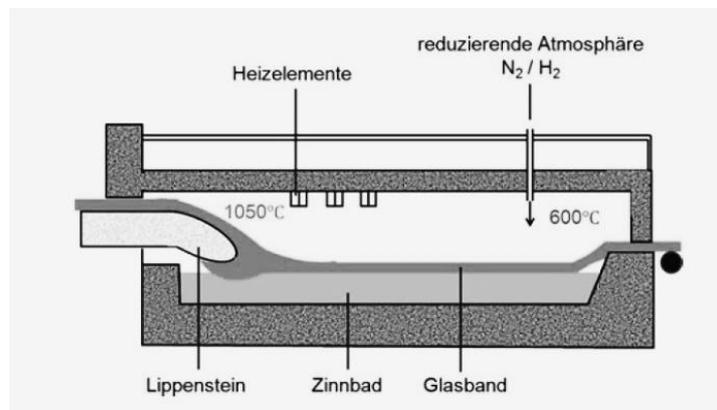


Abbildung 55: Schematische Darstellung des Floatverfahrens.²⁷⁰

6.3.6.2 Produktionsdaten

Untersuchungsrahmen der verwendeten Quelle

Frerichs Glas GmbH: Die Daten der Ökodeklaration repräsentieren die Herstellung von Flachglas, welches zu Einscheibensicherheitsglas oder Verbundsicherheitsglas weiterverarbeitet wird. Berücksichtigt sind die Produktionsschritte zur Herstellung von ESG und VSG, von der Gewinnung der Rohstoffe bis zum ESG/VSG, in Europa. Transportprozesse sind nicht berücksichtigt.

Die Daten für die Produktion von ESG und VSG stammen aus einer ökologischen Produkterklärung des Unternehmens Frerichs Glas GmbH. In Tabelle 37 sind die Daten

²⁶⁸ Vgl. (Schaeffer & Langfeld, 2014), S. 131ff.

²⁶⁹ Vgl. (Schaeffer & Langfeld, 2014), S. 143f.

²⁷⁰ (Schaeffer & Langfeld, 2014), S. 145.

für die Rohstoffgewinnung zu sehen. In Tabelle 38 sind die Produktionsdaten für die Herstellung von ESG und VSG aufgelistet.

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
4,088	0,182	0,348	EU	(Frerichs Glas GmbH, 2012)

Tabelle 37: Produktionsdaten der Rohstoffherstellung von Glas.²⁷¹

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
22,296	3,12	1,112	ESG/EU	(Frerichs Glas GmbH, 2012)
26,888	3,69	1,832	VSG/EU	

Tabelle 38: Produktionsdaten der Herstellung von Scheiben.²⁷²

6.3.7 Elektronik

In der Literatur bzw. in den öffentlichen Datenbanken finden sich wenige konkrete Daten zum Energieverbrauch und den Emissionen in der Produktion von elektronischen Bauteilen wie ECU, LCD-Display oder Aktuatoren. Für die Daten der ECUs wurde eine Studie der Chalmers University of Technology herangezogen. Um für LCD-Display und Aktuatoren eine grobe Abschätzung geben zu können, wurden Daten von elektronischen Consumer-Geräten (LCD-Bildschirmen) und eines 1,1 kW Elektromotors verwendet.

6.3.7.1 ECUs

Die Studie der Chalmers University of Technology bezieht sich auf ein Steuergerät, wie es im BMW Mini verwendet wird. Für die Verwendung der LCI-Daten wird angenommen, dass die Werkstoffverteilung der ECUs der vorliegenden Untersuchung dieselbe ist. Abbildung 56 zeigt die Werkstoffanteile der ECU.

²⁷¹ Eigene Darstellung.

²⁷² Eigene Darstellung.

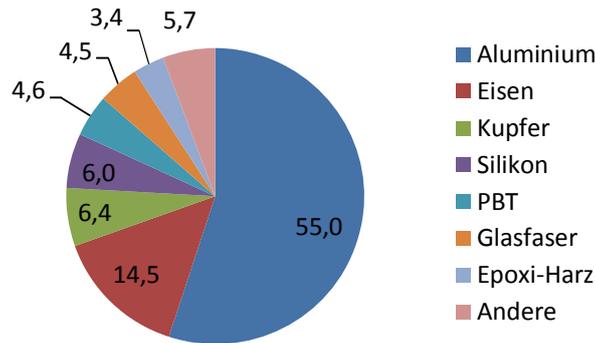


Abbildung 56: Werkstoffanteile in einer ECU in [%].²⁷³

6.3.7.1.1 Produktionsdaten ECU

Untersuchungsrahmen der verwendeten Quelle

Die Produktionsdaten der ECU werden aus einer LCA-Studie der schwedischen Chalmers University of Technology entnommen.²⁷⁴ Die Studie beinhaltet Daten für die Produktion -von der Rohstoffgewinnung bis zur fertigen ECU (Cradle to Gate) - der fünf bedeutendsten ECU-Teile (Gehäuse, Schrauben, Platine, Abdeckung und Label) angefangen. Zudem wurden die Transportprozesse zwischen den Zulieferern und dem Autoliv Werk in Motala und das Recycling der ECU berücksichtigt. Die Herstellung der ECU-Teile findet in verschiedenen Ländern in Asien und Europa statt.²⁷⁵

Die Daten für die ECU sind in Tabelle 39 ersichtlich.

KEA [MJ/ECU]	elektr. Energie [kWh/ECU]	THG [kgCO ₂ eq/ECU]	Anmerk.	Quelle
145,31	-	10,2	LCA-Daten/State of Art	(Suyang & Jungjung, 2010), S.40,S.60

Tabelle 39: Produktionsdaten einer ECU.²⁷⁶

²⁷³ Eigene Abbildung, vgl.(Suyang & Jungjung, 2010), S. 7.

²⁷⁴ (Suyang & Jungjung, 2010).

²⁷⁵ Vgl. (Suyang & Jungjung, 2010).

²⁷⁶ Eigene Darstellung.

6.3.7.2 LCD-Display

Für das LCD-Display wurden die Daten eines LCD-Bildschirms verwendet.

6.3.7.2.1 Produktionsdaten für das LCD-Display

Untersuchungsrahmen der verwendeten Quelle

IVF : Die Daten berücksichtigen die Rohstoffgewinnung und Werkstoffproduktion (Cradle to Gate) sowie die Fertigung des LCD-Displays (Gate to Gate) in Europa. Die Quelle gibt keine Angaben an, ob Transportprozesse in den Daten berücksichtigt worden sind.

Zum Umrechnen der Einheiten auf [MJ/kg], [kWh/kg] und [kgCO₂eq/kg] wird das Durchschnittsgewicht von 68 kg/m² verwendet.²⁷⁷ Die verwendeten Daten für das LCD-Display sind in Tabelle 40 zu sehen.

KEA [MJ/m ²]	elektr. Energie [kWh/m ²]	THG [kgCO ₂ eq/m ²]	Anmerk.	Quelle
9157	3982	508	Rohstoff/EU	(IVF, 2007), S. 168
1634	843	94	Herstellung/EU	

Tabelle 40: Daten LCD-Display.²⁷⁸

6.3.7.3 Kabelbaum

Für den Bezug von Daten bezüglich des Kabelbaums wird auf eine Datenbank des Unternehmens NICHIGOH aus Japan zurückgegriffen.²⁷⁹ Dieses Unternehmen entwickelte empirische Formeln, um Produktionsdaten für eine Vielzahl von Kabel zu ermitteln.²⁸⁰

6.3.7.3.1 Produktionsdaten für den Kabelbaum

Untersuchungsrahmen der verwendeten Quelle

Nichigoh: Berücksichtigt werden die Rohstoffgewinnung, die Herstellung der Werkstoffe, die Kabelproduktion und die Transportprozesse mit der länderspezifischen Situation in Japan. Die Nutzung und Verwertung sind nicht berücksichtigt.

Für die Daten des Kabelbaums werden die Kabel allein ohne Steckverbindungen und Kontakte berücksichtigt. In Tabelle 41 sind die Daten für Kabel mit einem, zwei und drei Leitern, sowie dem Batteriekabel zu sehen. Die Werte dieser Tabelle sind

²⁷⁷ Vgl. (IVF, 2007), S. 125.

²⁷⁸ Eigene Darstellung.

²⁷⁹ www.environdec.com/en/Detail/epd117#.Vqs48VKRLxM, Zugriffsdatum: 15.11.2015

²⁸⁰ Vgl. (Nichigoh Communication Electric Wire, 2012), S. 2ff.

Durchschnittswerte für Querschnitte, die in Fahrzeugen verwendet werden (siehe Kapitel 5.3.6).

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
85,78	2,795	2,21	1 Leiter	EPD Nichigoh
76,61	3,104	2,32	Batterie Leiter	
80,57	2,047	1,73	2 Leiter	
85,62	2,26	1,89	3 Leiter	
82,15	2,55	2,04	Mittelwert	

Tabelle 41: Daten Kabelbaum.²⁸¹

Für die Weitere Berechnung der Produktionsdaten des Kabelbaums wird der Mittelwert der Daten aus Tabelle 41 angenommen.

6.3.7.4 Starterbatterie

Es gibt verschiedene Arten von Akkumulatoren, die als elektrochemischer Energiespeicher in Fahrzeugen verwendet werden. Wie schon in Kapitel 5.3.6 beschrieben wurde, hat sich der Bleiakкумуляtor als Starterbatterie durchgesetzt.²⁸² Die Energiedichte von Bleiakкумуляtoren beträgt zwischen 35–55 Wh/kg.²⁸³

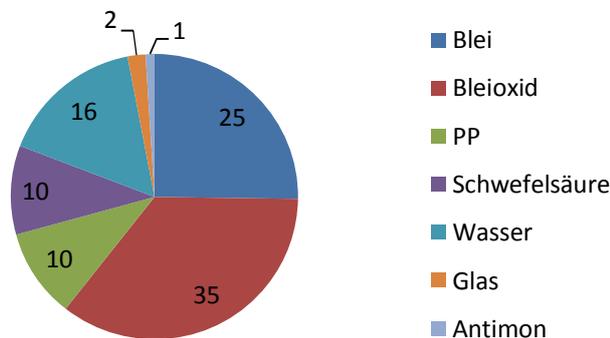


Abbildung 57: Werkstoffanteile eines Bleiakкумуляtors in [%].²⁸⁴

6.3.7.4.1 Produktionsdaten für die Starterbatterie

Untersuchungsrahmen der verwendeten Quelle

(Rydh & Sandén, 2005), (Sullivan & Gaines, 2010): Die Quellen berücksichtigen die Rohstoffgewinnung und den Herstellungsprozess der Batterie als Cradle to Gate Prozess sowie das Batterierecycling in Schweden. Der Transport der Rohstoffe zur Produktionsstätte ist in den Daten berücksichtigt.

²⁸¹ Eigene Abbildung.

²⁸² Vgl. (Babel, 2014), S. 23.

²⁸³ (Sullivan & Gaines, 2010).

²⁸⁴ Eigene Abbildung in Anlehnung an (Sullivan & Gaines, 2010), S. 8.

Die Daten für den Energieverbrauch und der daraus resultierenden Treibhausgasemissionen stammen aus Studien von Rydh /Sandén und Sullivan /Gaines. Rydh /Sandén beschreiben, dass 65 % des Energieverbrauchs für die Herstellung elektrischer Energie verwendet wird.²⁸⁵ Die Energiedichte ist ein wichtiger Parameter für den Werkstoffeinsatz in der Herstellung der Batterien. Deshalb sind der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen abhängig von der Energiedichte.²⁸⁶ Die Treibhausgasemissionen der Produktion sind für eine durchschnittliche Energiedichte von 42,5 Wh/kg laut Sullivan/Gaines mit 1,97 kgCO₂eq/kg Batterie angegeben. Daraus ergeben sich 0,046 kgCO₂eq/Wh. In Tabelle 42 sind die Daten für die Herstellung des Bleiakkumulators angegeben.

KEA [MJ/Wh]	elektr. Energie [kWh/Wh]	THG [kgCO ₂ eq/Wh]	Anmerk.	Quelle
0,45			Rohstoffherstellung (inkl. Recycling)	(Rydh & Sandén, 2005), S. 1970f.
0,42			Produktion/SWE	
		0,046	Cradle-to-Gate	(Sullivan & Gaines, 2010), S. 25

Tabelle 42: Produktionsdaten der Starterbatterie.²⁸⁷

6.3.7.5 Elektromotoren

Da weder in der Literatur noch in Datenbanken Daten für die Produktion von Gleichstrommotoren zu finden sind, werden die Daten für elektrische Motoren aus ökologischen Produkterklärungen (EPD) für Drehstrommotoren entnommen. Das Leistungsspektrum dieser Motoren befindet sich zwischen 1,1 und 110 kW.²⁸⁸ Die elektrischen Verbraucher im Fahrzeug wie Kraftstoffpumpe, Innengebläse, Verstellantriebe oder Kühlerventilator haben eine Leistungsaufnahme zwischen 120–350 W.²⁸⁹ Um die Elektromotoren in einem niedrigen Leistungsspektrum abbilden zu können, wird angenommen, dass die Werkstoffverteilung eines 1,1 kW Drehstrommotor dem eines Gleichstrommotoren zwischen 120–350 W entspricht. In Abbildung 58 sind die Werkstoffanteile eines 1,1 kW Motors ersichtlich.

²⁸⁵ Vgl. (Rydh & Sandén, 2005), S. 1970f.

²⁸⁶ Vgl. (IFEU, 2011), S. 22.

²⁸⁷ Eigene Darstellung.

²⁸⁸ Vgl. (VEM, 2013);

²⁸⁹ Vgl. (Borgeest, 2014), S. 5

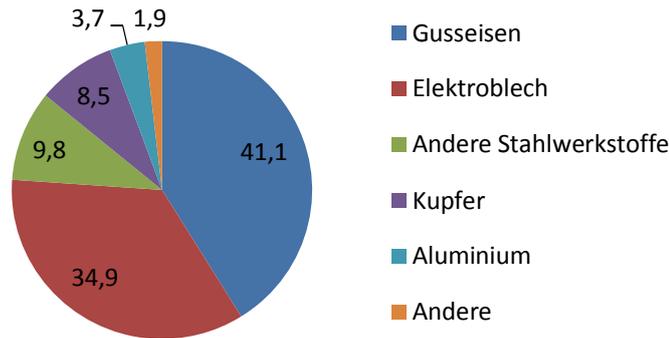


Abbildung 58: Werkstoffanteil eines Drehstrommotors mit 1,1 kW in [%]²⁹⁰

6.3.7.5.1 Produktionsdaten für die Elektromotoren

Untersuchungsrahmen der verwendeten Quellen

VEM: Ökologische Produkterklärung des Unternehmens VEM. Die Daten beinhalten Werte für elektrischen und thermischen Energieverbrauch zur Herstellung von Drehstrommotoren auf Basis des deutschen Strommix. Die Quelle gibt keine Angaben ob Transportprozesse in den Daten inkludiert sind. Die Werte für den 1,1 kW Motor sind in Tabelle 43 ersichtlich.

therm. Energie [kWh/kW]	elektr. Energie [kWh/kW]	THG [kgCO ₂ eq/kW]	Anmerk.	Quelle
164,65	35,61	57,27	-/DE	(VEM, 2013)

Tabelle 43: Daten für Elektromotoren.²⁹¹

Die Werte sind durch die getroffenen Annahmen der Werkstoffzusammensetzung schließlich abhängig von der Masse der Motoren. Zur Umrechnung der Werte wird die Motormasse mit 14,85 kg/kW angenommen. Die Daten der Elektromotoren sind in Tabelle 44 ersichtlich.

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
63,03	2,4	3,5	-/DE	(VEM, 2013)

Tabelle 44: Daten für Elektromotoren.²⁹²

²⁹⁰ Eigene Abbildung in Anlehnung an (VEM, 2013)

²⁹¹ Eigene Darstellung

²⁹² Eigene Darstellung.

6.3.7.1 Elektrische Komponenten

Um eine grobe Abschätzung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen von elektrischen Komponenten, wie den Knöpfen und den Schaltern im Cockpit, dem Lenkrad oder den Sitzen geben zu können, wird angenommen, dass der Aufbau der Knöpfe und Schalter ähnlich dem der Industrieschalter ist und sie dieselbe Werkstoffzusammensetzung besitzen. Die durchschnittliche Werkstoffzusammensetzung der recherchierten Industrieschalter ist in Abbildung 59 dargestellt.

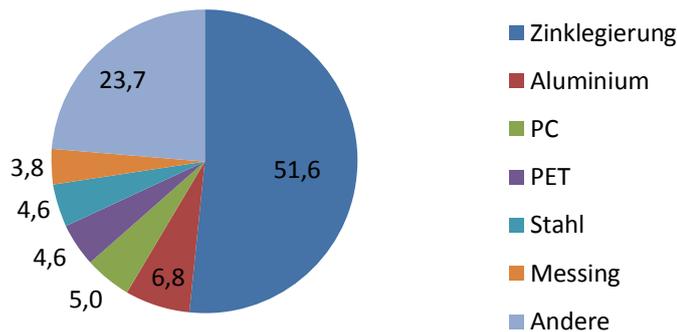


Abbildung 59: Werkstoffanteile der Knöpfe und Schalter in [%].²⁹³

6.3.7.1.1 Produktionsdaten für die elektrischen Komponenten

Untersuchungsrahmen der verwendeten Quellen

Schneider Electric: Das Unternehmen Schneider Electric gibt Daten in ökologischen Produkterklärungen für verschiedene Industrieschalter an. Die verwendeten Daten berücksichtigen die Rohstoffgewinnung und die Produktion der Schalter (Cradle to Gate). Die Quelle gibt keine Angaben darüber an, ob diese Daten Transportprozesse berücksichtigen und wo die Produktion stattfindet.

Für die Ermittlung der Produktionsdaten wurden sechs verschiedene Druckknöpfe betrachtet und der Mittelwert der Daten verwendet. Die verwendeten Produktionsdaten sind in Tabelle 45 aufgelistet.

²⁹³ Durchschnittliche Werkstoffzusammensetzung laut den verwendeten Quellen.

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
131,25	-	6,95	-/-	(Schneider Electric, 2012b)
159,84	-	10,983	-/-	(Schneider Electric, 2012c)
148,39	-	10,49	-/-	(Schneider Electric, 2012d)
150,72	-	10,68	-/-	(Schneider Electric, 2012a)
166,97	-	11,65	-/-	(Schneider Electric, 2012a)
159,67	-	11,77	-/-	(Schneider Electric, 2010)
152,81	-	10,42	Mittelwert	

Tabelle 45: Daten Elektrische Komponenten

6.3.8 Airbag

Die Werkstoffzusammensetzung der Airbags wurde aus einer Studie der Chalmers University of Technology entnommen. In Abbildung 60 ist die Werkstoffverteilung des Fahrerairbag des Volvo C30 gegeben.

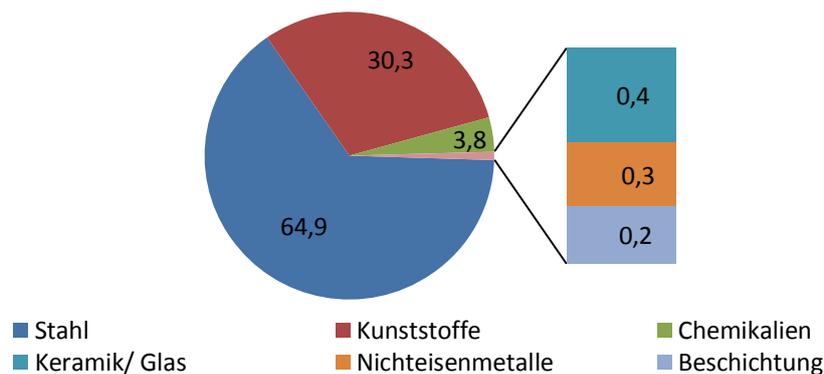


Abbildung 60: Werkstoffanteile in einem Fahrerairbag in [%].²⁹⁴

6.3.8.1 Produktionsdaten Airbag

Untersuchungsrahmen der verwendeten Quelle

Die Produktionsdaten für die Herstellung des Airbags, stammen aus einer LCA- Studie der Chalmers Universität of Technology. Diese berücksichtigt die Herstellung der einzelnen Teile eines Airbags (Gasgenerator, Gehäuse, Textilstoff, Abdeckung, Schrauben) von der Rohstoffgewinnung (Cradle to Gate), der Produktion bis zum fertigen Airbag (Gate to Gate) und das Recycling. Die Herstellung der Komponenten erfolgt in verschiedenen Ländern in Europa und Asien, der Zusammenbau in Schweden. Die Daten beinhalten die Transportprozesse. Nicht berücksichtigt in den Daten werden Sensoren, Kabel und Steuergerät des Airbagsystems. Die Daten für die Produktion eines Airbags sind in Tabelle 46 dargestellt.

²⁹⁴ Eigene Darstellung in Anlehnung an (Mujiyanto & Susetyo, 2010), S. 5.

KEA [MJ/kg]	elektr. Energie [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quelle
73,97	-	1,92	LCA-Daten/State of Art	(Mujiyanto & Susetyo, 2010)

Tabelle 46: Produktionsdaten eines Airbags.²⁹⁵

Die Daten des Airbags werden für alle im Fahrzeug verwendeten Airbags (Fahrer, Beifahrer, Seitenairbags) verwendet. Dafür wird angenommen, dass die Werkstoffanteile der verschiedenen Airbags denen aus Abbildung 60 entsprechen.

6.4 Produktionsaufwand der Fahrzeugkomponenten

Dieses Kapitel beschreibt die Ermittlung des gesamten kumulierte Energieaufwands und der resultierenden Treibhausgasemissionen für die Fahrzeugkomponenten Cockpit, Lenkrad, Sitze, Scheiben, Elektronik und Behälter des Motorraums. Ausgehend von der Massenbilanz aus Kapitel 5.3 und den recherchierten Daten aus Kapitel 6.3 werden die Produktionsdaten für die unterschiedlichen Baugruppen berechnet.

Im Folgenden wird die Ermittlung des Energieaufwands und der resultierenden Treibhausgasemissionen für die Herstellung der untersuchten Fahrzeugkomponenten beschrieben. Der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen werden für jeden Prozess von der Rohstoffgewinnung bis zu den Herstellungsprozessen mittels recherchierte Daten und mit Hilfe der Formeln (3) bis (8) berechnet. Die Berechnungsschemen sind in Anhang dargestellt. Die kumulierten Energieaufwände und resultierenden Treibhausgasemissionen des Herstellungsprozesses werden mit der Masse der jeweiligen Teile multipliziert (siehe Formel (9) und (10)). Anschließend werden die Teile der Fahrzeugkomponenten laut Fahrzeugkomponentenanalyse aufaddiert (siehe Formel (11) und (12)); somit ergeben sich der gesamte kumulierte Energieaufwand und die resultierenden Treibhausgasemissionen für die Fahrzeugkomponenten. Die Ergebnisse des Produktionsaufwandes für die analysierten Fahrzeugkomponenten sind in Anhang D aufgelistet.

Im Folgenden wird die Art und Weise der Darstellung der Produktionsdaten beschrieben und anschließend auf die ermittelten Produktionsdaten der Fahrzeugkomponenten eingegangen. Abbildung 61 zeigt beispielhaft die Darstellung der drei Szenarien (Min-, Max- und State of Art-Szenario) für die Treibhausgasemissionen eines Lenkrades mit Magnesiumkern im C-Segment. Der

²⁹⁵ Eigene Darstellung.

Balken bildet dabei das State of Art-Szenario ab. Die Min- und Max-Szenario werden durch die Abweichungen vom State of Art-Szenario dargestellt.

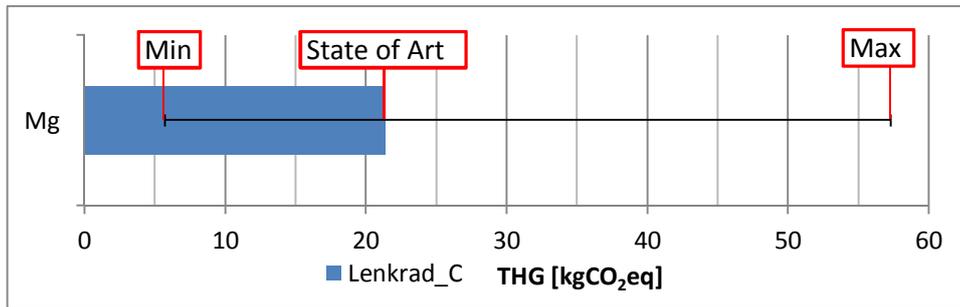


Abbildung 61: Beispiel: Darstellung der Produktionsszenarien.²⁹⁶

6.4.1 Lenkrad

Aufbauend auf der Massebilanz und den recherchierten Produktionsdaten für die Herstellung von Lenkradskelett, PUR-Schaum, Abdeckungen, elektronischen Komponenten und Airbag wurden der kumulierte Energiebedarf und die Treibhausmissionen des Lenkrades nach Formel (9) bis (12) ermittelt. Detaillierte Werte zu den gesamten Produktionsdaten des Lenkrades sind in Anhang D, Tabelle 61 aufgelistet.

In Abbildung 62 sind die Werte des Energiebedarfs für die Lenkradproduktion abhängig vom Werkstoff des Lenkradskeletts zu sehen. Grundsätzlich liegt der Energiebedarf im State of Art- und Max-Szenario für die Produktion von Lenkrädern mit Magnesiumkern, aufgrund des höheren Energiebedarfs der Magnesiumherstellung, höher als mit Aluminiumkern. Im Min-Szenario unterscheiden sich die Produktionswerte durch die Annahme der Verwendung von Sekundärwerkstoff und den dadurch bedingten Wegfall der Rohstoffproduktion nicht wesentlich.

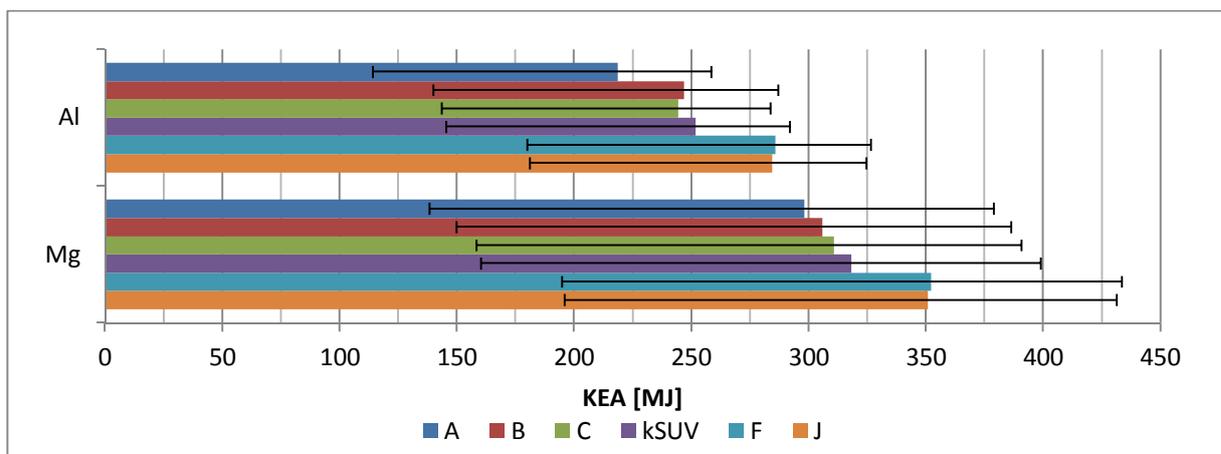


Abbildung 62: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Lenkradbaugruppe.²⁹⁷

²⁹⁶ Eigene Darstellung.

In Abbildung 63 sind die gesamten Treibhausgasemissionen der Lenkradbaugruppe abgebildet. Die hohen Treibhausgasemissionen bei der Herstellung des Lenkrades mit Magnesiumkern im Max-Szenario lassen sich durch die Verwendung von SF₆ als Schutzgas und der ausschließlichen Verwendung von Primärmagnesium erklären. Im Vergleich zum State of Art-Szenario, sind diese um bis zu 177 % höher. Im Min-Szenario sind die Treibhausgasemissionen aufgrund des Wegfalls der Primärwerkstoffproduktion von Magnesium und Aluminium sowie der Annahme der Produktion in Norwegen niedriger.

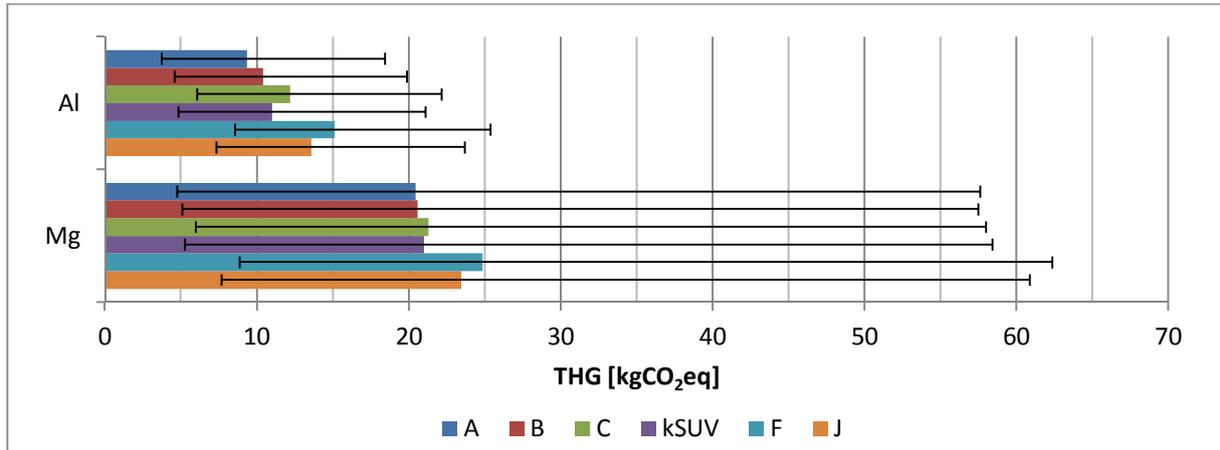


Abbildung 63: Treibhausgasemissionen der Lenkradbaugruppe.²⁹⁸

6.4.2 Cockpit

In Abbildung 64 sind der Energiebedarf für das Cockpit in Abhängigkeit von der Werkstoffwahl des Querrohrträgers und des Segments abgebildet. Detaillierte Werte zu den Produktionsdaten des Cockpits sind in Anhang D, Tabelle 61 gegeben. Wie die Werkstoff- und Massebilanz in Kapitel 5.3.1 (Abbildung 23) zeigt, werden in den untersuchten Fahrzeugen in den Segmenten A und kSUV keine Magnesiumquerrohrträger verbaut, weshalb in Abbildung 64 und Abbildung 65 keine Daten für diese Cockpits abgebildet sind. Allgemein ist ersichtlich, dass der Energiebedarf in den oberen Segmenten aufgrund der höheren Masse und dem höheren Elektronikanteil zunimmt. Der Vergleich zwischen Cockpits mit einem Querrohrträger aus Stahl und einem aus Magnesium zeigt, dass sich im Min-Szenario der Energiebedarf aufgrund des Wegfalls der Rohstoffproduktion nicht wesentlich unterscheidet. Im Max-Szenario wird im Vergleich dazu bis zu 93 % mehr Energie benötigt. Im State of Art-Szenario ist der Unterschied des Energiebedarfs für die Herstellung des Cockpits mit Magnesiumquerrohrträger um bis zu 72,5 % höher. Ausgehend vom State of Art-Szenario beträgt die Differenz des Energiebedarfs zum

²⁹⁷ Eigene Darstellung.

²⁹⁸ Eigene Darstellung.

Min-Szenario beim Cockpit mit Stahlquerrohrträger bis zu 63 %, beim Cockpit mit Magnesiumquerrohrträger bis zu 76 %.

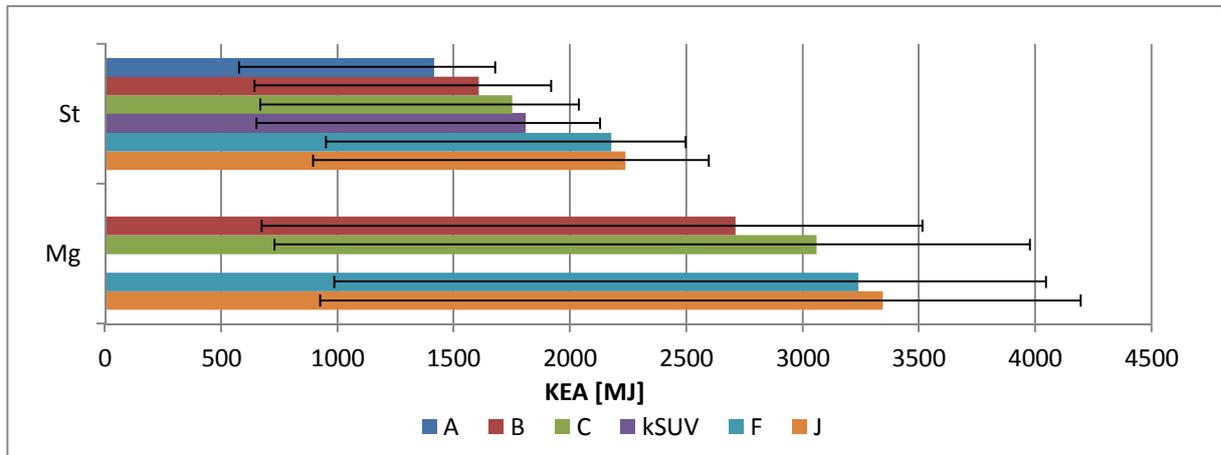


Abbildung 64: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Cockpitbaugruppe.²⁹⁹

Abbildung 65 zeigt die Treibhausgasemissionen der Cockpit-Produktion. Das Cockpit mit Querrohrträger aus Magnesium kann im Min-Szenario aufgrund des „Inhouse“-Recyclings im Magnesiumdruckgussprozess um bis zu 8% geringere Treibhausgasemissionen als das Cockpit mit Stahlquerrohrträger aufweisen. Im State of Art-Szenario sind die Treibhausgasemissionen für das Cockpit mit Magnesiumquerrohrträger um bis zu 170 % höher. Im Max-Szenario sind die Treibhausgasemissionen aufgrund der Verwendung von SF₆ als Schutzgas im Magnesiumdruckguss mit bis zu 424 % deutlich höher. Ausgehend vom State of Art-Szenario sind die Treibhausgasemissionen im Min-Szenario aus der Herstellung des Cockpits mit Stahlquerrohrträger um bis zu 58 % niedriger, mit einem Magnesiumquerrohrträger um bis zu 85 % niedriger.

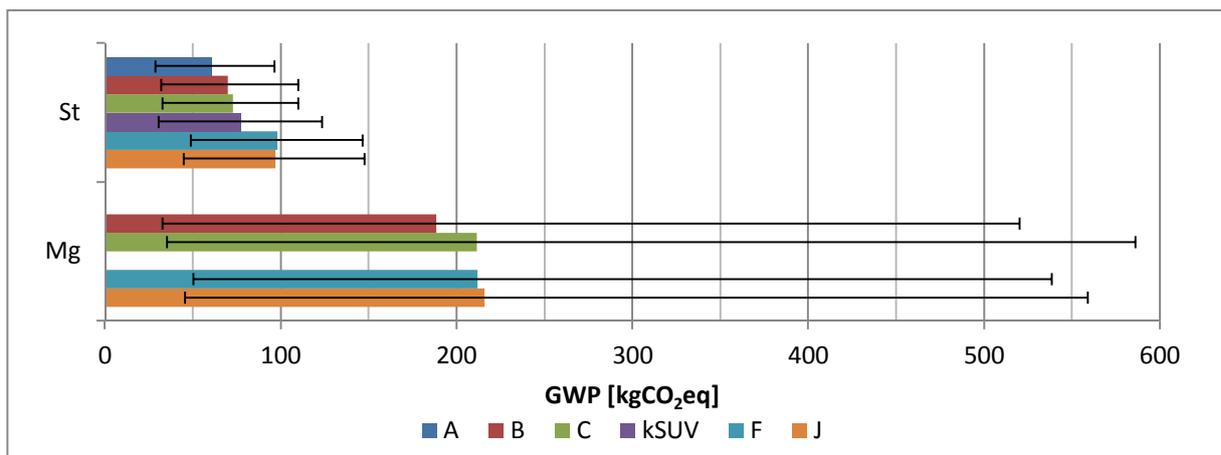


Abbildung 65: Treibhausgasemissionen der Cockpitbaugruppe.³⁰⁰

²⁹⁹ Eigene Darstellung.

³⁰⁰ Eigene Darstellung.

6.4.3 Sitze

In Abbildung 66 ist der Energiebedarf für die Produktion für Fahrersitz, Beifahrersitz und die Rückbank, abhängig vom jeweiligen Segment und Szenario, zu sehen. Genaue Angaben zu den Produktionsdaten sind in Anhang D, Tabelle 61 gegeben. Deutlich erkennbar ist die Zunahme des Energiebedarfs in den oberen Segmenten, was auf das höhere Gewicht der Sitzgarnitur (siehe Kapitel 5.3.3, Abbildung 28–Abbildung 30) und die Auslegung der Sitze hinsichtlich eines höheren Komfort-Standards zurückzuführen ist. Die Differenz zwischen Fahrersitz und Beifahrersitz im C- und F-Segment ist durch die höhere Masse des Fahrersitzes bedingt. Der Energiebedarf des Min-Szenarios der Sitze liegt für Fahrer- und Beifahrersitz um bis zu 46 % und für die Rücksitze um bis zu 43 % unterhalb des State of Art-Szenario.

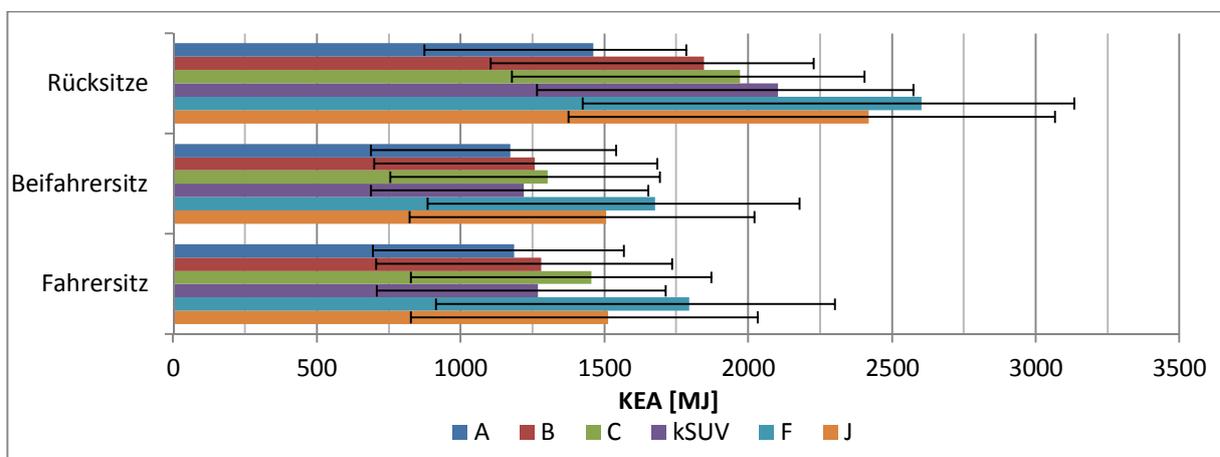


Abbildung 66: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Sitze.³⁰¹

Abbildung 67 zeigt die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung von Fahrersitz, Beifahrersitz und der Rückbank. Ähnlich dem Energiebedarf steigen auch die Treibhausgasemissionen, besonders im Max-Szenario in den oberen Segmenten stark an. Im Min-Szenario sind die Treibhausgasemissionen im Verhältnis zum State of Art-Szenario bei Fahrer- und Beifahrersitz um bis zu 58 % und bei der Rückbank und bis zu 55 % geringer. Grund dafür ist der norwegischen Strommix mit einem Emissionsfaktor von 0,049 kgCO₂/kWh, der den Daten zugrunde liegt und die Produktion der Stahl- und Kunststoffteile ausschließlich aus Sekundärwerkstoffen.

³⁰¹ Eigene Darstellung.

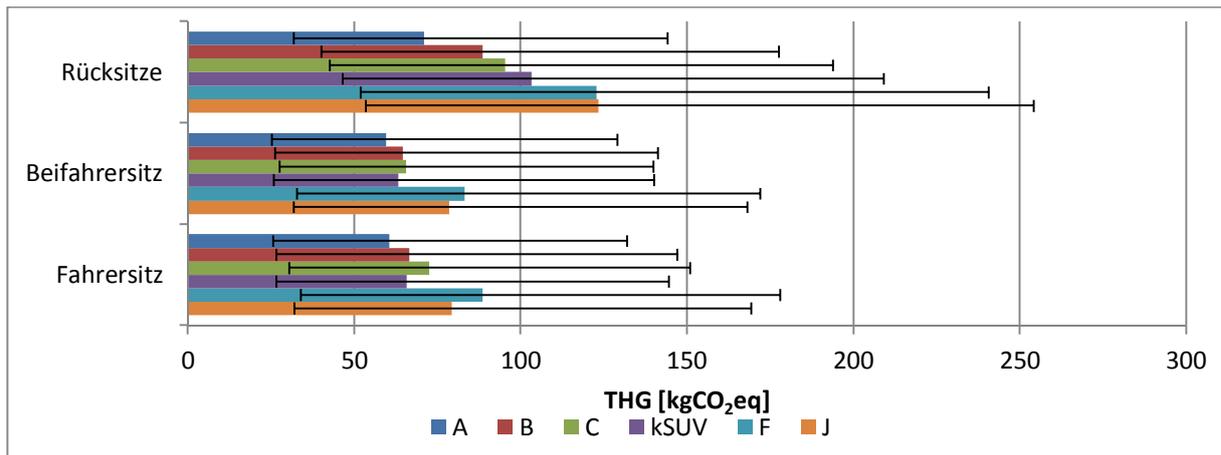


Abbildung 67: Treibhausgasemissionen der Sitze.³⁰²

6.4.4 Scheiben

Die Baugruppe Scheiben besteht aus der Windschutzscheibe, den Seitenscheiben und der Heckscheibe. In Abbildung 68 sind die Werte für den Primärenergiebedarf der Scheiben in den drei Szenarien zu sehen. Detaillierte Produktionsdaten der Scheiben sind in Anhang D, Tabelle 61 ersichtlich. Bei der Produktion der Scheiben in Norwegen können aufgrund der günstigen Emissionen aus der Stromproduktion bis zu 27 % des Primärenergiebedarfs eingespart werden.

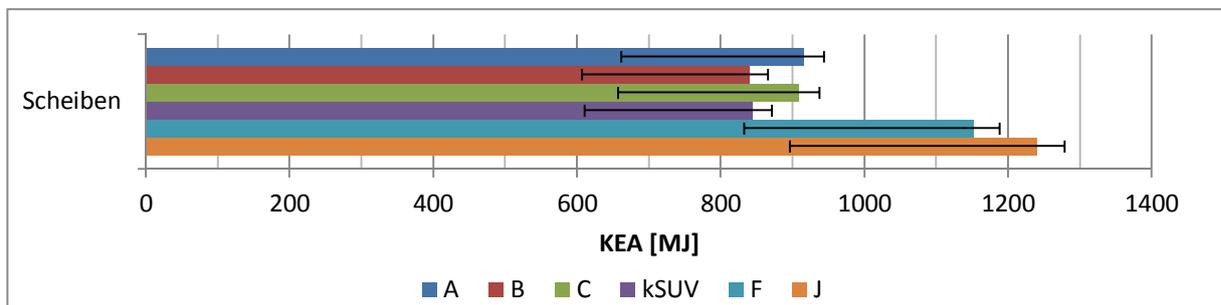


Abbildung 68: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Scheiben.³⁰³

Auffällig ist der starke Anstieg des Energiebedarfs im F- und J-Segment, welcher mit der deutlich höheren Gesamtmasse der Scheiben zusammenhängt.

Abbildung 69 zeigt die Treibhausgasemissionen der Scheibenproduktion für die drei Szenarien. Ebenso wie beim Energiebedarf steigen die Treibhausgasemissionen in den oberen Segmenten drastisch an. Im Min-Szenario sind die Treibhausgasemissionen aufgrund der Produktion mit norwegischem Strommix um 30 % deutlich geringer als im State of Art-Szenario.

³⁰² Eigene Darstellung.

³⁰³ Eigene Darstellung.

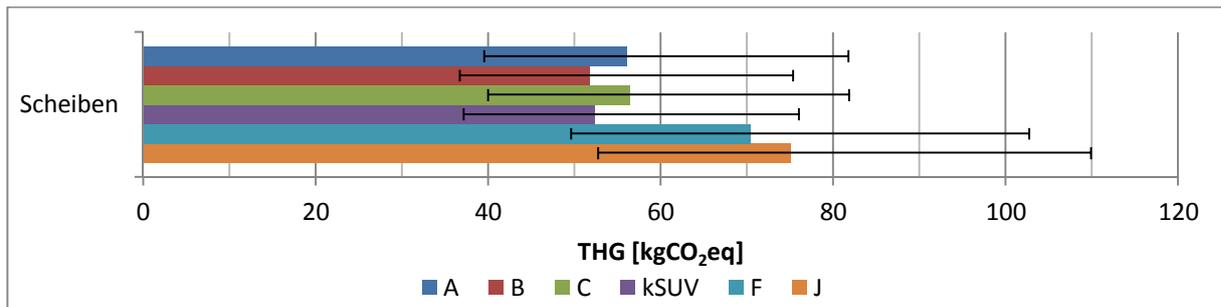


Abbildung 69: Treibhausgasemissionen der Scheiben.³⁰⁴

6.4.5 Elektronik

Für die Elektronikteile Starterbatterie, Kabelbaum und die ECUs nehmen der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen mit steigendem Segment stark zu. Abhängig von der Energiedichte, welche wesentlichen Einfluss auf den Werkstoffeinsatz und somit den Produktionsdaten der Starterbatterie hat und des verwendeten Länderstrommix ergeben sich die Szenarien in Abbildung 70 und Abbildung 71. In Abbildung 70 ist der Energiebedarf für die Starterbatterie, den Kabelbaum und die ECUs zu sehen. Die Produktionsdaten für die Elektronikteile sind in Anhang D, Tabelle 61 ersichtlich. Für die ECUs sind keine Produktionsdaten bezüglich des elektrischen Energieverbrauchs bekannt, weshalb die erhaltenen Daten als State of Art angenommen worden sind. Speziell bei der Produktion der Bauteile in Ländern mit hohem regenerativem Energieanteil (z.B. Norwegen) lassen sich Energieeinsparungen von bis zu 28 % (Starterbatterie) und 18 % (Kabelbaum) im Vergleich zum State of Art-Szenario erzielen.

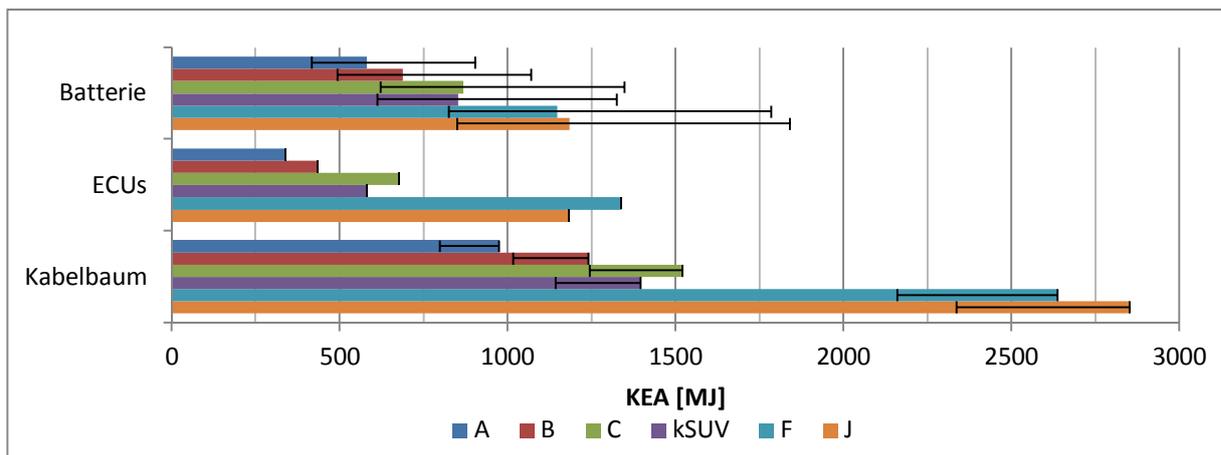


Abbildung 70: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Elektronik.³⁰⁵

Aufgrund des großen Anteils bei der Produktion benötigter elektrischer Energie können die Treibhausgasemissionen bei einer Produktion der Starterbatterie in Norwegen und

³⁰⁴ Eigene Darstellung.

³⁰⁵ Eigene Darstellung.

niedriger Energiedichte (35 Wh/kg) bis zu 6 % gegenüber dem State of Art-Szenario reduziert werden. Bei der Produktion der Starterbatterie in Australien sind die Treibhausgasemissionen um 117 % höher als im State of Art-Szenario. Bei der Produktion des Kabelbaums in Vergleich von Min- und State of Art-Szenario, können die Treibhausgasemissionen um 64 % reduziert werden. In Abbildung 71 sind die Treibhausgasemissionen der Produktion von Starterbatterie, Kabelbaum und ECUs in den verschiedenen Szenarien und Segmenten ersichtlich.

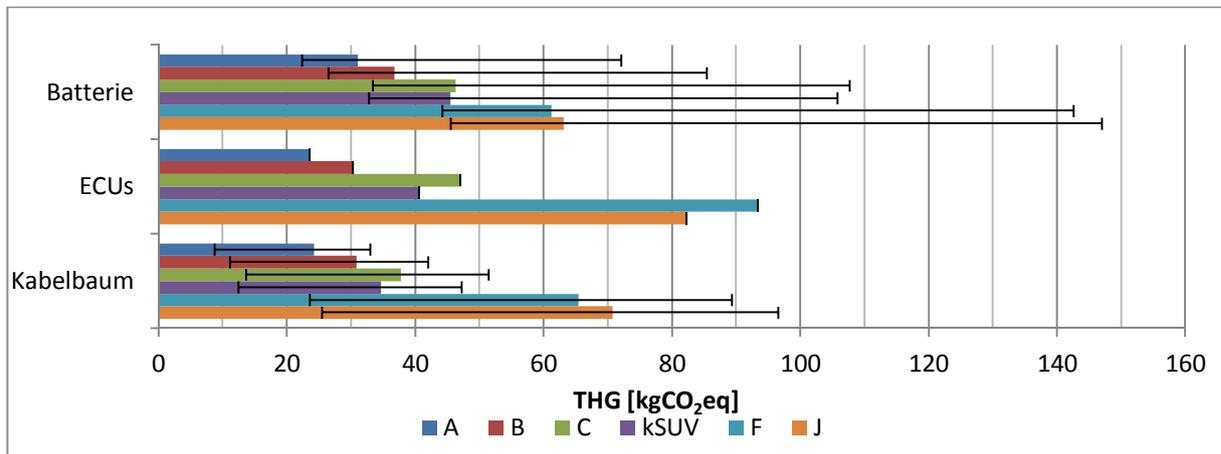


Abbildung 71: Treibhausgasemissionen Elektronik.³⁰⁶

6.4.6 Motorraum

Die Abdeckungen im Motorraum bestehen zumeist aus PP oder PA. Aufgrund des hohen Anteils an PA der Abdeckungen im F-Segment sind der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen dementsprechend höher (Abbildung 72, Abbildung 73). Im Vergleich des Min- zum State of Art-Szenario kann der Energiebedarf um bis zu 90 % reduziert werden. Verantwortlich dafür sind der Wegfall der Rohstoffgewinnung und der norwegische Strommix. Abbildung 72 zeigt den Energiebedarf für die Herstellung von Abdeckungen im Motorraum in Abhängigkeit vom Segment. Die detaillierten Produktionsdaten sind in Anhang D, Tabelle 61 angegeben.

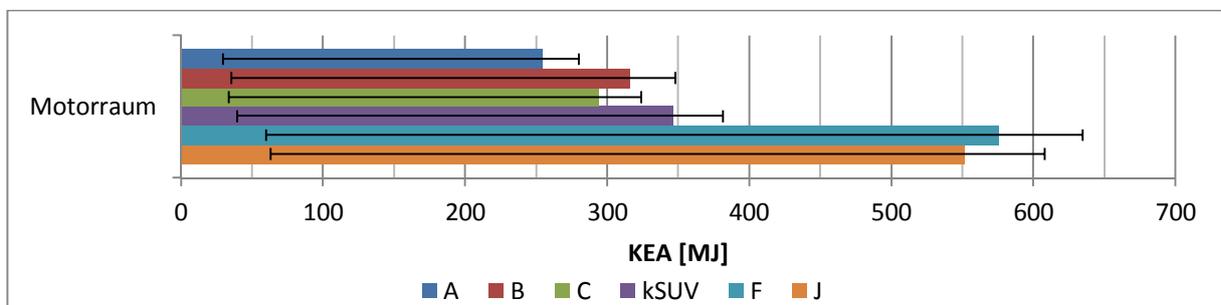


Abbildung 72: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Motorraumkomponenten.³⁰⁷

³⁰⁶ Eigene Darstellung.

In Abbildung 73 sind die Treibhausgasemissionen für die verschiedenen Szenarien und Segmente abgebildet. Bei der Produktion in Norwegen können bis zu 90 % der entstandenen Treibhausgasemissionen im Vergleich zum State of Art-Szenario reduziert werden.

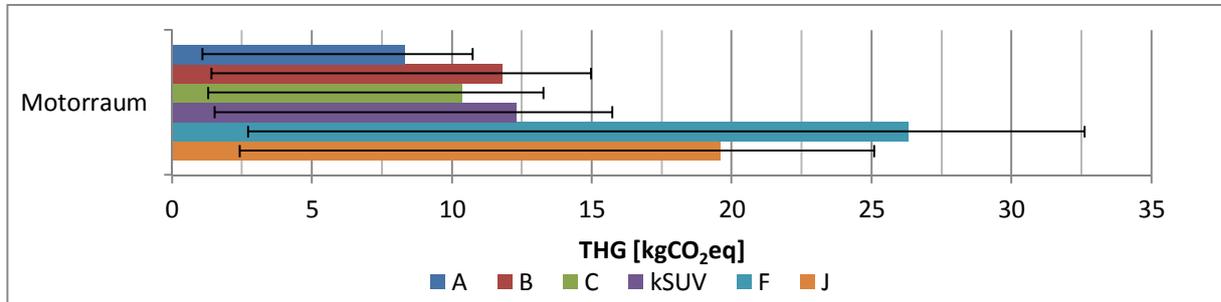


Abbildung 73: Treibhausgasemissionen der Motorraumkomponenten.³⁰⁸

6.4.7 Airbags

Die verwendete Quelle³⁰⁹ macht keine Angaben zum elektrischen Energiebedarf in der Produktion der Airbags, weshalb der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen als State of Art-Daten verwendet werden. Der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen steigen aufgrund der höheren Masse in den oberen Segmenten, an. In Abbildung 74 ist der Energiebedarf für die Herstellung der Curtain-Airbags dargestellt. Die Produktionsdaten sind in Anhang D, Tabelle 61 ersichtlich.

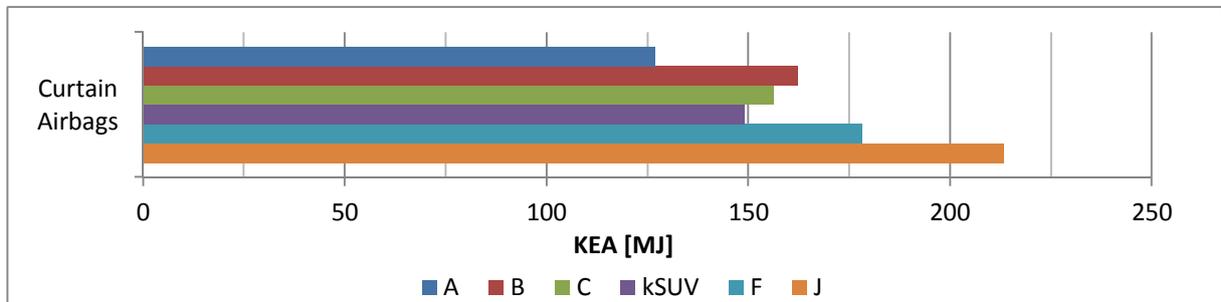


Abbildung 74: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Curtain-Airbags.³¹⁰

Abbildung 75 zeigt die resultierenden Treibhausgasemissionen für die Herstellung der Curtain-Airbags.

³⁰⁷ Eigene Darstellung.

³⁰⁸ Eigene Darstellung.

³⁰⁹ (Mujiyanto & Susetyo, 2010).

³¹⁰ Eigene Darstellung.

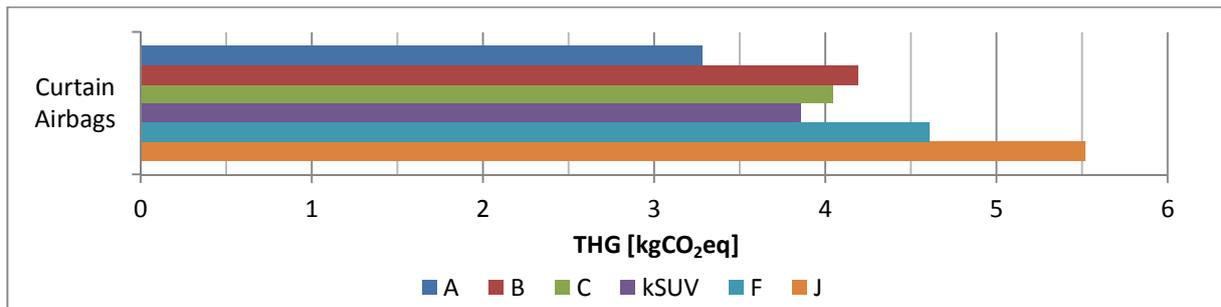


Abbildung 75: Treibhausgasemissionen der Curtain-Airbags.³¹¹

³¹¹ Eigene Darstellung.

7 Erstellung eines Modul-Generators zur Zusammenfassung erhobener Daten

Aufbauend auf der Datenlage der analysierten Baugruppen und zur Implementierung weiterer Daten aus vorangegangenen Arbeiten von Zottler³¹² und Maurer³¹³ wurde ein Werkzeug entwickelt, um den Produktionsaufwand einzelner Baugruppen oder eines vollständigen Fahrzeuges zu berechnen. Das Modul-Konzept umfasst nach derzeitigem Entwicklungsstand die folgenden Fahrzeugbaugruppen: Antrieb, Fahrwerk und Aufbau mit Karosserie, Interieur, Exterieur und Elektrik/Elektronik.³¹⁴

Mit dem Modul-Generator ist es möglich eine Vielzahl an verschiedenen Fahrzeugen zu generieren und deren Produktionsdaten hinsichtlich des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen zu ermitteln. Für die Ermittlung der gesamten Produktionsdaten eines konfigurierten Fahrzeugs wurde im Hintergrund des Modul-Generators eine Datenbank angelegt, welche die Produktionsdaten für jede Fahrzeugkomponente beinhaltet. Im Auswahlmenü lassen sich durch Auswahl der Fahrzeugkomponenten unterschiedliche Baugruppen oder Fahrzeuge konfigurieren. Der Generator berechnet im Hintergrund die gesamten Produktionsdaten des konfigurierten Fahrzeugs und gibt diese als Ergebnis aus. Zusätzlich hat der Benutzer die Möglichkeit, Werte für die Nutzungsphase im Auswahlmenü einzugeben. Im Feld „Ergebnis“ stehen dem Benutzer die berechneten Werte für das vorher konfigurierte Bauteile oder Fahrzeug zur Verfügung. Für die Berechnung des Produktionsaufwandes und die Archivierung der konfigurierten Fahrzeuge in einem Fahrzeug-Pool wurden zwei Excel-Makros entwickelt. Diese Excel-Makros wurden mithilfe der in Excel integrierten Visual Basic-Programmierungsumgebung erstellt und im Modul-Generator implementiert. Der Fahrzeug-Pool dient als Fahrzeug-Bibliothek und als Ausgangspunkt für spätere Simulationen der Nutzungsphase. In Abbildung 76 ist die Benutzeroberfläche des Modul-Generators dargestellt.

³¹² (Zottler, 2014).

³¹³ (Maurer, 2013).

³¹⁴ In Anlehnung an: (Heißing, Ersoy & Gies, 2011), S. 1.

Abbildung 76: Auszug aus Modul-Konzept für die Berechnung des Produktionsaufwandes.³¹⁵

7.1 Produktionsbedarf für ein generiertes Fahrzeug

Im Folgenden wird als Beispiel ein Fahrzeug mit den in dieser Arbeit untersuchten Komponenten und einer Karosserie generiert. Daran soll der Anteil der untersuchten Komponenten am gesamten Produktionsbedarf eines generierten Fahrzeugs veranschaulicht werden. Der Querrohrträger des Cockpits wird aus Magnesium gefertigt, Ausnahmen sind das A- und KSUV-Segment, hier besteht der Querrohrträger aus Stahl. Der Lenkradkern wird aus Magnesium, die Karosserie aus Aluminium hergestellt.

In Abbildung 77 ist der kumulierte Energieaufwand (State of Art-Szenario) der Herstellung zu sehen. Die Herstellung der Karosserie bestimmt den kumulierten Energieaufwand mit bis zu 81 % deutlich. Zwischen 8 und 9 % sind auf den Fahrersitz, den Beifahrersitz und die Rückbank zurückzuführen. 3 bis 5 % des kumulierten Energiebedarfs resultieren aus der Herstellung des Cockpits.

³¹⁵ Eigene Darstellung.

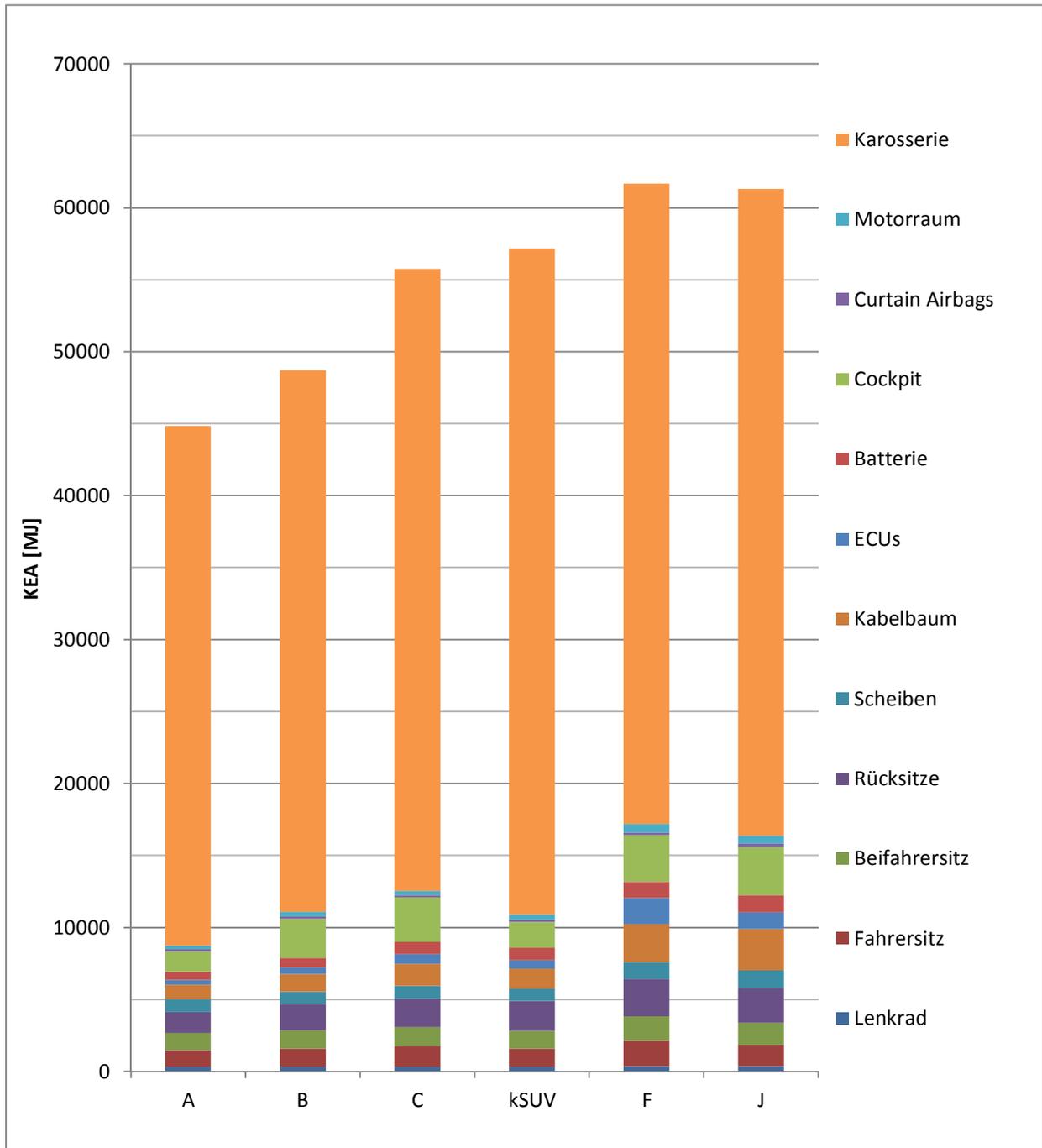


Abbildung 77: Kumulierter Energieaufwand eines generierten Fahrzeugs.³¹⁶

Abbildung 78 zeigt die Anteile der Treibhausgasemissionen für die Produktion der Fahrzeugkomponenten. Wie vorher werden auch die aus der Produktion resultierenden Treibhausgasemissionen von der Herstellung der Karosserie mit bis zu 85 % dominiert, gefolgt von den Sitzen mit 8 % und dem Cockpit mit etwa 2 bis 6 %.

³¹⁶ Eigene Darstellung.

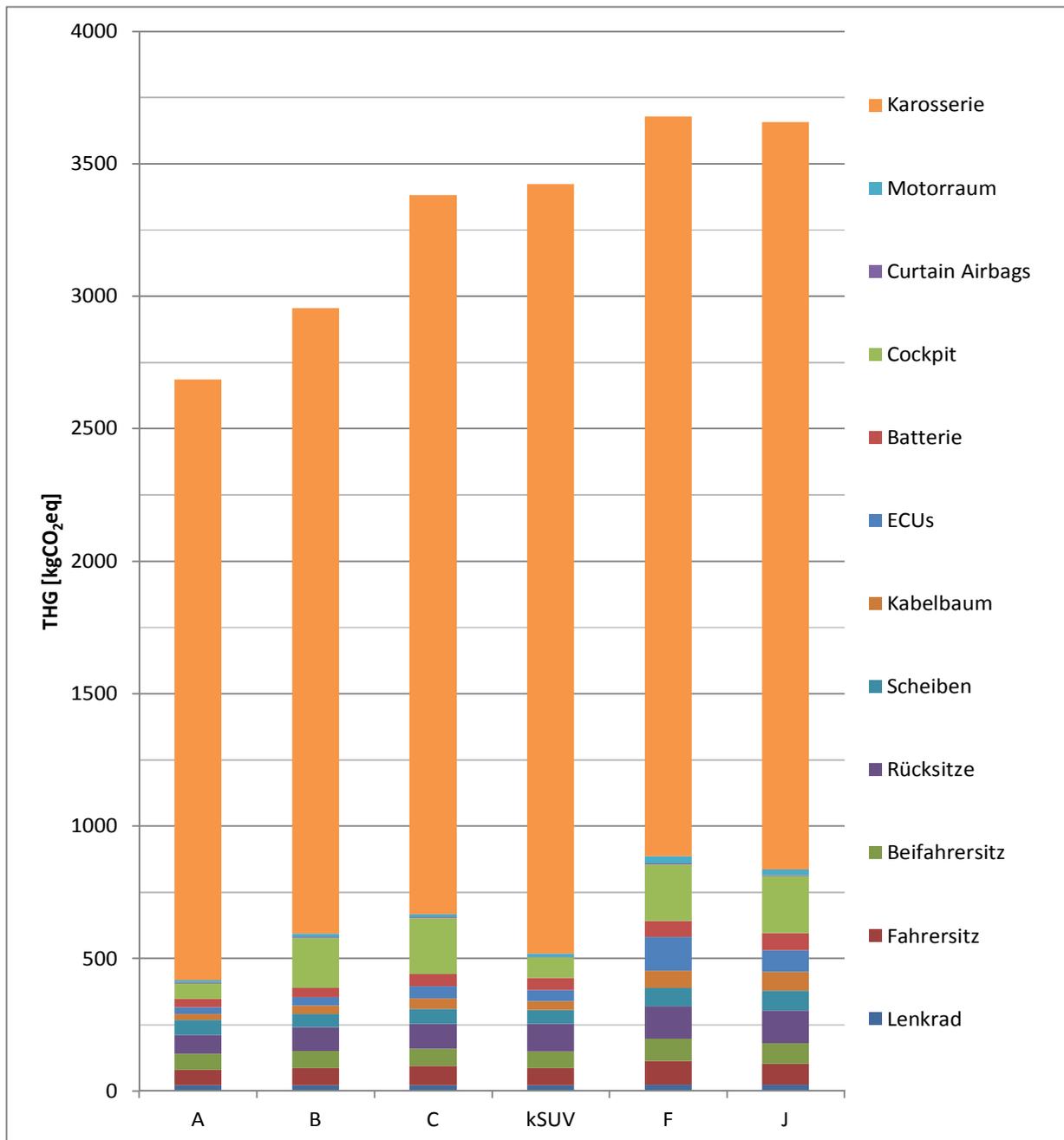


Abbildung 78: Treibhausgasemissionen eines generierten Fahrzeugs.³¹⁷

Das größte Einsparungspotenzial des generierten Fahrzeugs besteht, wie in den obigen Abbildungen deutlich zu sehen ist, in der Herstellung der Karosserie. Im Cockpit und den Sitzen liegt das größte Einsparungspotenzial der Komponenten, welche in dieser Arbeit untersucht wurden. In den Segmenten A und kSUV wurde im Cockpit wie erwähnt ein Querrohrträger aus Stahl verwendet. In der Abbildung kann man das Einsparungspotenzial hinsichtlich des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen gegenüber einem Querrohrträger aus Magnesium erkennen.

³¹⁷ Eigene Darstellung.

8 Einflusses möglicher gesetzlicher Lenkungseffekte in der Produktion

Hinsichtlich der Treibhausgasemissionen werden gegenwärtig nur die CO₂-Emissionen der Nutzungsphase der Fahrzeuge durch die Europäische Union reglementiert. Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit dem Einfluss weiterer möglicher Reglementierungsmöglichkeiten des Gesetzgebers, die über die Phase des Betriebs hinausgehen und die Produktion von Automobilteilen berücksichtigen. Folgend wird auf zwei mögliche gesetzliche Lenkungseffekte eingegangen:

- Festlegung reglementierter Werte für den Rezyklatanteil in den Bauteilen,
- Festlegungen reglementierter Werte für den Anteil an der Produktion beteiligter regenerativer Energie.

8.1 Lenkungseffekt Rezyklatanteil

Fahrzeughersteller und Zulieferer in der Automobilindustrie werden gesetzlich verpflichtet, einen festgelegten prozentuellen Anteil der Werkstoffmasse als Rezyklat bzw. Sekundärwerkstoffen in den Bauteilen zu verarbeiten. Durch sortenreines Recycling können Bauteile aus Sekundärwerkstoffen ohne Qualitätseinbußen erzeugt werden. Nötig dafür sind genaue Werkstoffkennzeichnungen der Bauteile, ein Rücknahmesystem der Hersteller bzw. Lieferanten oder eine Weiterentwicklung der Separationstechnologien um die Werkstoffe sortieren zu können. Zurzeit erfolgt eine indirekte Regulierung des Rezyklatanteils über die EU-Altautoverordnung. Seit 1.1.2015 gilt für Altautos eine Recyclingquote von 95 %, davon dürfen 10 % energetisch verwertet werden, maximal 5 % dürfen auf Deponien beseitigt werden.³¹⁸

Im Folgenden wurde zum Vergleich des Einflusses einer Reglementierung des Rezyklatanteils in der Herstellung von Fahrzeugkomponenten am Beispiel Lenkrad und Cockpit durchgeführt. Die Sekundärwerkstoffanteile wurden je Werkstoff gegenüber dem State of Art-Szenario (siehe Kapitel 6.2.1, Tabelle 12) um 10 % erhöht. Der Energiebedarf im Lenkrad senkt sich dadurch um durchschnittlich 5–6 %, die Treibhausgasemissionen um 5 % mit Aluminium- und um 9 % mit Magnesiumkern.

In Abbildung 79 sind der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen der Lenkradbaugruppe bei Erhöhung des Rezyklatanteils um 10 % dargestellt.

³¹⁸ Vgl. (Gruden, 2008), S. 292.

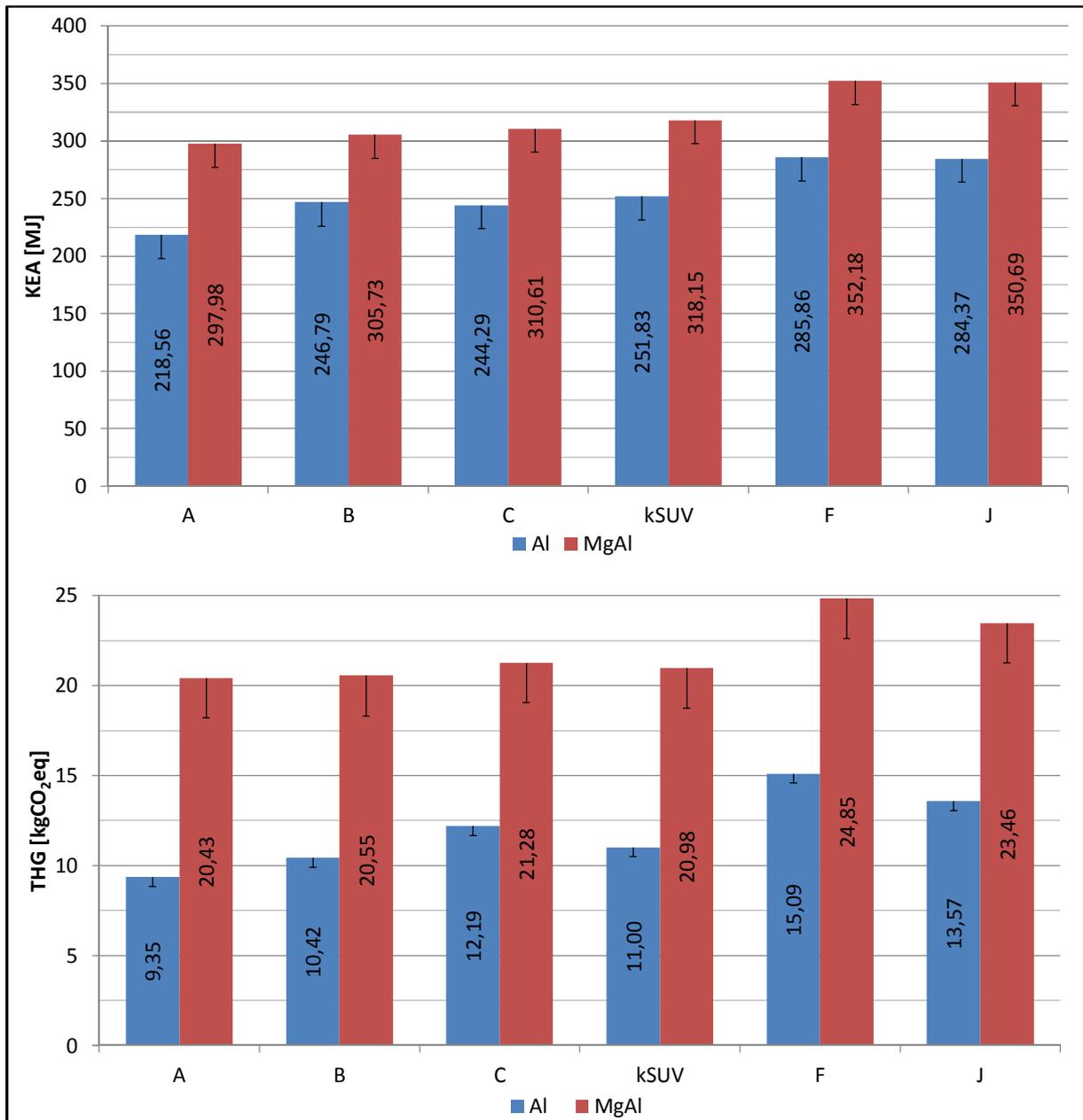


Abbildung 79: Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Lenkradbaugruppe bei Erhöhung des Rezyklatanteil um 10%.³¹⁹

Abbildung 80 zeigt das Reduktionspotenzial der Cockpitbaugruppe bei der Erhöhung des Rezyklatanteils um 10 % abhängig vom Querrohrträgerwerkstoff. Der Energiebedarf bei Erhöhung des Rezyklatanteils um 10 % senkt sich durchschnittlich um 6,5 % bei Verwendung von Stahl und um 8,5 % bei Magnesium als Querrohrträgerwerkstoff. Die Treibhausgasemissionen sind um durchschnittlich 6,5 % (Stahlquerrohrträger) bzw. um 12 % (Magnesiumquerrohrträger) geringer.

³¹⁹ Eigene Darstellung

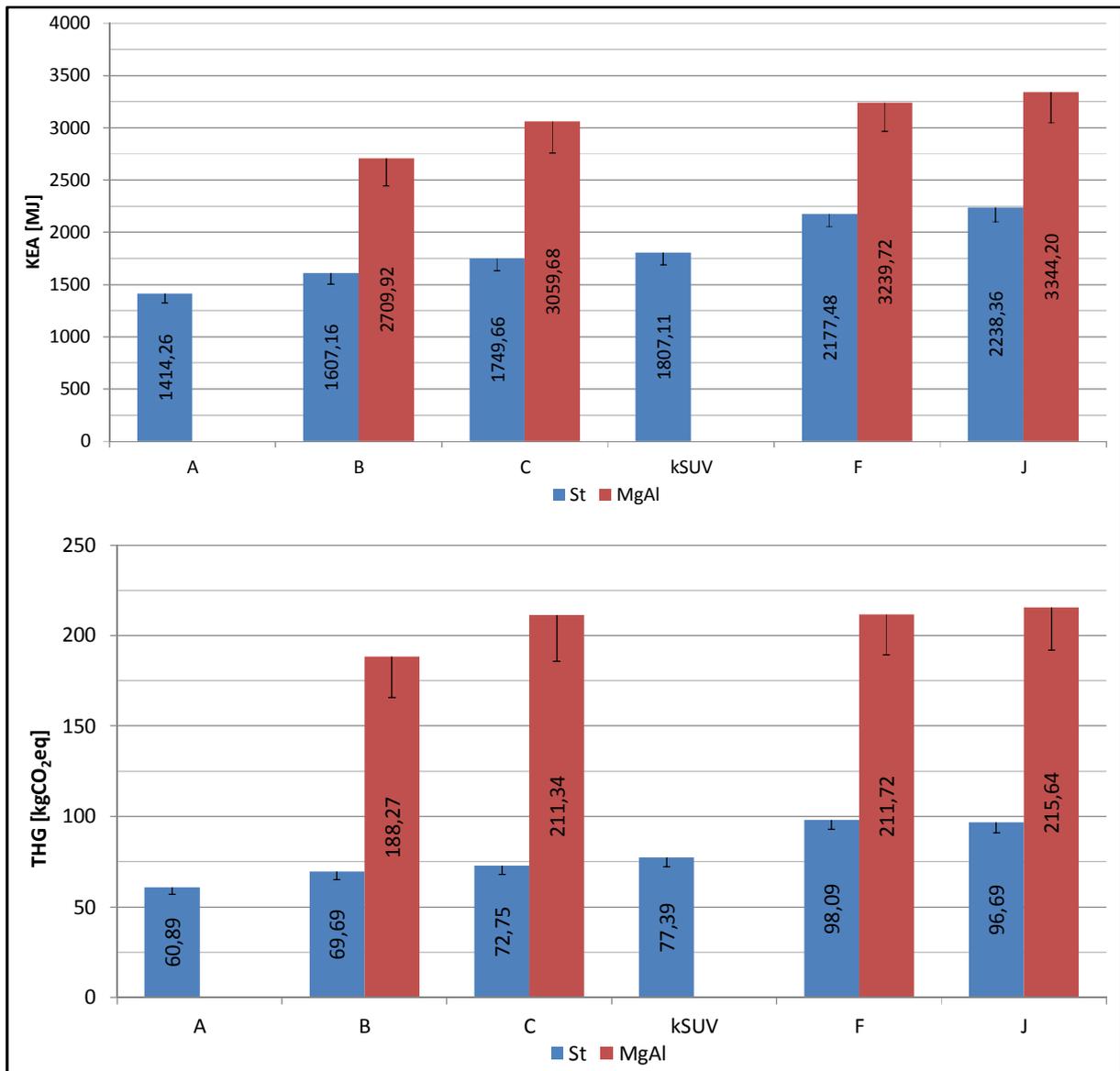


Abbildung 80: Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Cockpitbaugruppe bei Erhöhung des Rezyklatanteils um 10%.³²⁰

Die Schwierigkeiten bei der Regulierung des Rezyklatanteils in den Fahrzeugbauteilen sind die Nachweisbarkeit der Sekundärwerkstoffe. Hier müssen Methoden zur einfachen und eindeutigen Bestimmung des Rezyklatanteils in den Bauteilen gefunden und entwickelt werden.

8.1.1 Beispiele für den Einsatz von Rezyklat im Automobilbau

Grundsätzlich wird in der Praxis Rezyklat als Sekundärrohstoff für Bauteile ohne besondere Qualitätsanforderungen eingesetzt. Das Interieur und Exterieur des BMW i3

³²⁰ Eigene Darstellung.

bestehen zu jeweils 25 % aus Kunststoffrezyklaten und nachwachsenden Rohstoffen. Teile wie die Radhausschalen bestehen jetzt schon aus bis zu 100 % Rezyklat.³²¹

8.2 Lenkungseffekt regenerative Energie

Fahrzeughersteller und Zulieferer werden vom Gesetzgeber verpflichtet, einen festgelegten Anteil der zur Bauteilproduktion benötigten Energie nachweislich aus regenerativen Energiequellen (z.B.: Bioenergie, Erdwärme, Wasserkraft, Windenergie, Sonnenenergie) zu entnehmen. Für einen Vergleich wurden die Baugruppen ausgehend vom State of Art-Szenario mit einem Strommix für Norwegen und für Australien abgebildet. Der norwegische Strommix wird verwendet, da er wie erwähnt zu 93,4 % aus Strom von Wasserkraftwerken stammt. Der australische Strommix wurde verwendet, da dieser zu rund 70 % aus Strom von Kohlekraftwerken besteht.

Tabelle 47 und Abbildung 81 zeigen die Reduktionspotenziale sowohl für den Energiebedarf als auch die Treibhausgasemissionen für die Baugruppe Lenkrad in Abhängigkeit der verschiedenen Fahrzeugsegmente sowie der jeweiligen Metallskelette des Lenkrades.

Lenkradskelett	Reduktionspotenzial							
	Aluminium				Magnesium			
Segment	KEA [MJ]	KEA [%]	GWP [kgCO ₂ eq]	GWP [%]	KEA [MJ]	KEA [%]	GWP [kgCO ₂ eq]	GWP [%]
A	57	24,1	3,8	40	26,1	8,8	2	9,9
B	60,8	24,6	4	38,3	26,3	8,6	1,9	9,1
C	56,6	23,2	4,3	35,4	24,4	7,9	1,7	8,2
kSUV	63,7	25,3	4,4	40	31,5	9,9	2,2	10,5
F	61,3	21,4	4,3	28,7	29,1	8,25	2,0	8,2
J	62	21,8	4,3	31,8	29,8	8,5	2,1	8,9

Tabelle 47: Lenkrad Reduktionspotenzial Strommix Norwegen.³²²

Bei der Produktion eines Lenkrads mit Aluminiumskelett in Norwegen reduziert sich der Energiebedarf um bis zu 30 % und die Treibhausgasemissionen um bis zu 43 %. Mit Magnesiumskelett beträgt das Reduktionspotenzial für den Energiebedarf bis zu 10 % und für die Treibhausgasemissionen ebenso bis zu 10 %.

³²¹

Vgl. www.volkswagen.de/de/markenwelt/verantwortung/recycling/produktentstehung/produktentstehung.html,
Zugriffsdatum: 15.12.2015; vgl. www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2015/nachhaltigkeit.html#production; Zugriffsdatum: 1.3.2016.

³²² Eigene Darstellung.

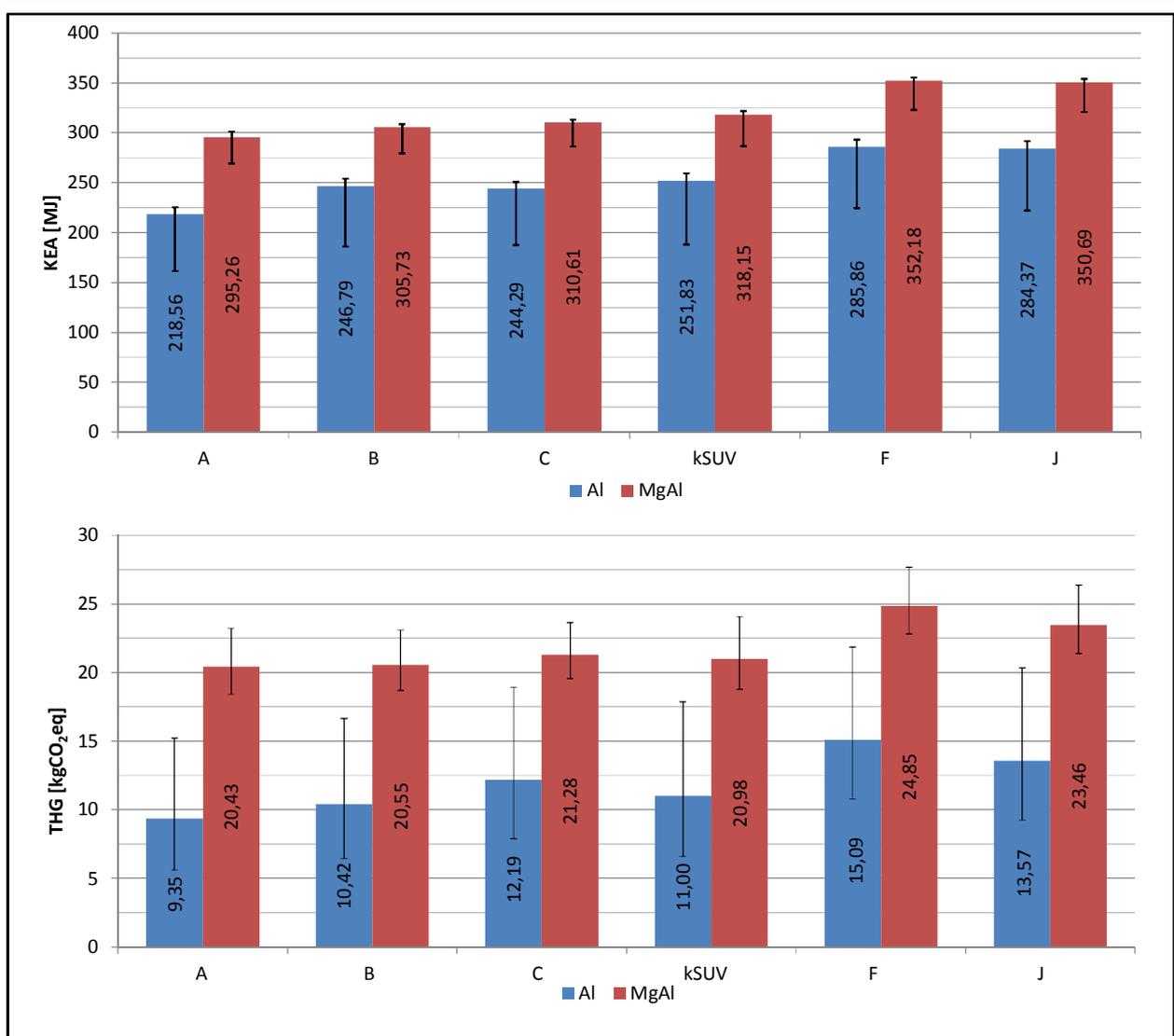


Abbildung 81: Kumulierter Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Lenkradbaugruppe mit Strommix Norwegen und Australien³²³

Tabelle 48 und Abbildung 82 zeigen das Reduktionspotenzial für die Baugruppe des Cockpits mit dem norwegischen Strommix. Abhängig vom Werkstoff des Querrohrträgers sowie des Fahrzeugsegments beträgt das Reduktionspotenzial bis zu 11 % des Energiebedarfs und bis zu 17 % der Treibhausgasemissionen bei Querrohrträgern aus Stahl. Bei der Produktion des Cockpits in Norwegen mit Querrohrträgern aus Magnesium, beträgt das Reduktionspotenzial für den Energiebedarf bis zu 8 % und für die Treibhausgasemissionen ebenfalls bis zu 8 %.

³²³ Eigene Darstellung.

Einfluss des möglicher gesetzlicher Lenkungseffekte in der Produktion

Querrohrträger	Reduktionspotenzial							
	Stahl				Magnesium			
Segment	KEA [MJ]	KEA [%]	THG [kgCO ₂ eq]	THG [%]	KEA [MJ]	KEA [%]	THG [kgCO ₂ eq]	THG [%]
A	122,6	8,7	8,5	14	-	-	-	-
B	119,5	7,4	8,5	12,1	142	5,3	12,2	6,5
C	130,8	7,5	9,1	12,5	169	5,6	14,3	6,8
kSUV	185,2	10,3	12,7	16,4	-	-	-	-
F	220,3	10,1	15	15,2	245,1	7,6	18,7	8,8
J	209,4	9,4	14,3	14,8	231,7	7	18	8,4

Tabelle 48: Cockpit Reduktionspotenzial Strommix Norwegen.³²⁴

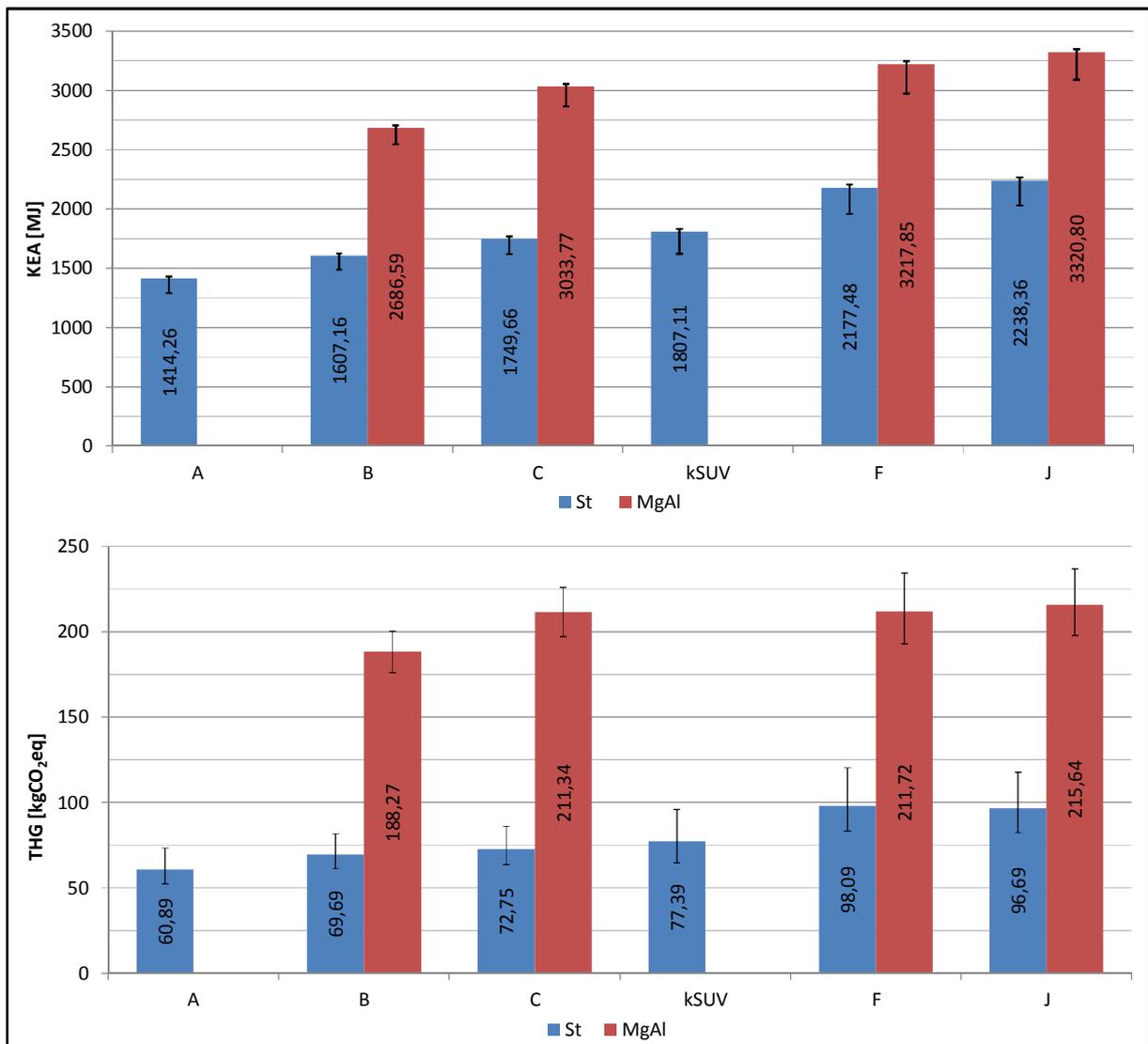


Abbildung 82: Kumulierter Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Cockpitbaugruppe mit Strommix Norwegen und Australien.³²⁵

³²⁴ Eigene Darstellung.

³²⁵ Eigene Darstellung.

8.2.1 Beispiele für den Einsatz regenerativer Energie in der Produktion

Die Herstellung der energieintensiven Carbonfasern für die CFK-Komponenten des BMW i3 in Moses Lake (USA) erfolgt mit Energie aus dem Wasserkraftwerk des Grand Coulee Dam. Das BMWi-Werk in Leipzig wird ebenso mit regenerativer Energie versorgt, hier erfolgt die Energiebereitstellung durch Windenergie.³²⁶

8.3 Beispiel für Umweltschutzgesetze in der Produktion

Die Verwendung von klimaschädlichem SF₆ als Schutzgas für den Magnesiumdruckguss ist seit 1.1.2008 von der EU-Kommission für alle Unternehmen in der Europäischen Union mit einem SF₆-Verbrauch von mehr als 850 kg pro Jahr verboten.³²⁷ Damit reagiert die EU-Kommission auf die hohe klimaschädigende Wirkung von SF₆ im Vergleich zu anderen Schutzgasen wie R134a. In Abbildung 83 ist der Einfluss der verschiedenen Schutzgase für den Magnesiumdruckguss zu sehen.

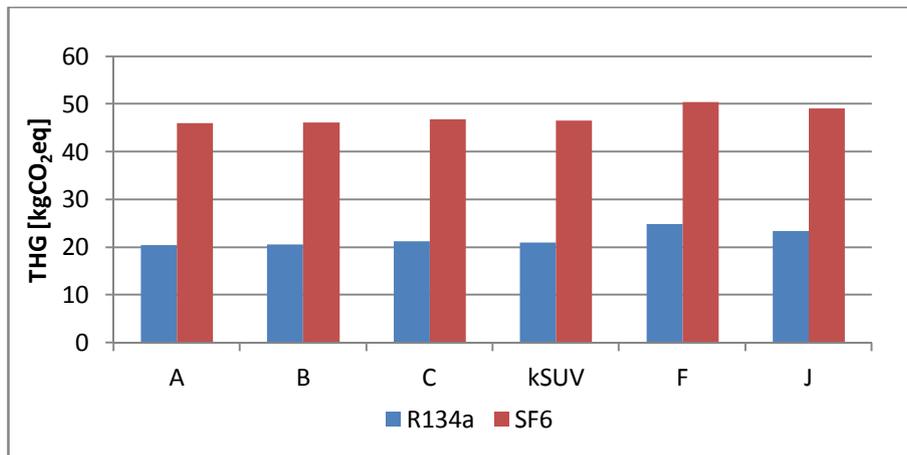


Abbildung 83: Einfluss des Schutzgases auf die Treibhausgase der Lenkradproduktion.³²⁸

³²⁶ Vgl. www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2015/nachhaltigkeit.html#production; Zugriffsdatum: 1.3.2016.

³²⁷ Vgl. (Europäische Union, 2008).

³²⁸ Eigene Darstellung.

9 Gesamtheitliche Betrachtung der Treibhausgas-emissionen eines Fahrzeugs

Für die gesamtheitliche Betrachtung der Treibhausgasemissionen muss zur Produktion der Fahrzeugkomponenten die Nutzungsphase des Fahrzeugs berücksichtigt werden. Dazu wurde ein Fahrzeug mit konventionellem Ottomotor bzw. ein weiteres mit elektrischem Antrieb mit einer Laufleistung von 200.000 km betrachtet. Als Ausgangsbasis dienen die ermittelten Produktionsdaten von Komponenten der vorliegenden und der Aluminiumkarosserie einer vorangegangenen Arbeit³²⁹. Erweitert werden diese Daten mit zwei verschiedenen Antriebskonzepten, einen konventionellen Antrieb mit Ottomotor sowie ein Elektroantrieb mit Elektromotor und Lithium-Ionen-Batterie. Die Daten der Treibhausgasemissionen für die Produktion der Antriebskonzepte stammen aus der UMBReLA Studie³³⁰.

9.1 Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugproduktion

Die Treibhausgasemissionen der Komponenten der vorliegenden Arbeit berücksichtigen den Einfluss des Sekundärwerkstoffanteils und des norwegischen Strommix im Min-Szenario, des australischen Strommix im Max-Szenario. Im State of Art-Szenario wird von den gegenwärtigen Gegebenheiten der Produktion ausgegangen. Die Daten der Treibhausgasemissionen der Karosserieproduktion sind nur vom Strommix beeinflusst. Die Produktionsdaten für Ottomotor, Elektromotor und Lithium-Ionen Batterie wurden wie erwähnt aus der UMBReLA Studie entnommen und stellen einen State of Art-Wert dar. Die Treibhausgasemissionen der Produktion der berücksichtigten Komponenten sind in Tabelle 49 ersichtlich.

³²⁹ Vgl. (Zottler, 2014)

³³⁰ (IFEU, 2011)

Gesamtheitliche Betrachtung der Treibhausgas-emissionen eines Fahrzeugs

Fahrzeugkomponenten	Einheit	THG			Quelle:
		Min	State of Art	Max	
C-Segment					
Komponenten dieser Arbeit	[kgCO ₂ eq]	289,3	665	1421,4	eigene Berechnung
Karosserie	[kgCO ₂ eq]	1954,7	2713,7	3900	Zottler (2014)
Ottomotor	[kgCO ₂ eq]	516	516	516	IFEU (2011)
E-Motor	[kgCO ₂ eq]	260	260	260	
Li-Ionen Batterie	[kgCO ₂ eq]	5000	5000	5000	
Montage des Fahrzeugs	[kgCO ₂ eq]	1500	1500	1500	
Summe VKM	[kgCO ₂ eq]	4260	5394,6	7337	eigene Berechnung
	[gCO ₂ eq/km]	21,3	27	36,7	eigene Berechnung
Summe E-Motor	[kgCO ₂ eq]	9004	10138,6	12080	eigene Berechnung
	[gCO ₂ eq/km]	45,02	50,7	60,4	eigene Berechnung

Tabelle 49: Treibhausgasemissionen von Fahrzeugkomponenten.³³¹

In Abbildung 84 ist ein Vergleich zwischen den resultierenden Treibhausgasemissionen der Antriebskonzepte im State of Art-Szenario dargestellt. Die Aluminiumkarosserie bestimmt die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung der berücksichtigten Komponenten des Fahrzeugs mit Ottomotor deutlich mit ca. 50 %. Aufgrund der höheren Treibhausgasemissionen in der Produktion des Elektroantriebs (Lithium-Ionen Batterie und Elektromotor) beträgt der Anteil an den gesamten der Treibhausgasemissionen der Aluminiumkarosserie knapp 27 %. Hauptverursacher der hohen Treibhausgasemissionen ist hier die Produktion der Lithium-Ionen Batterie mit ca. 50 %.

³³¹ Eigene Darstellung.

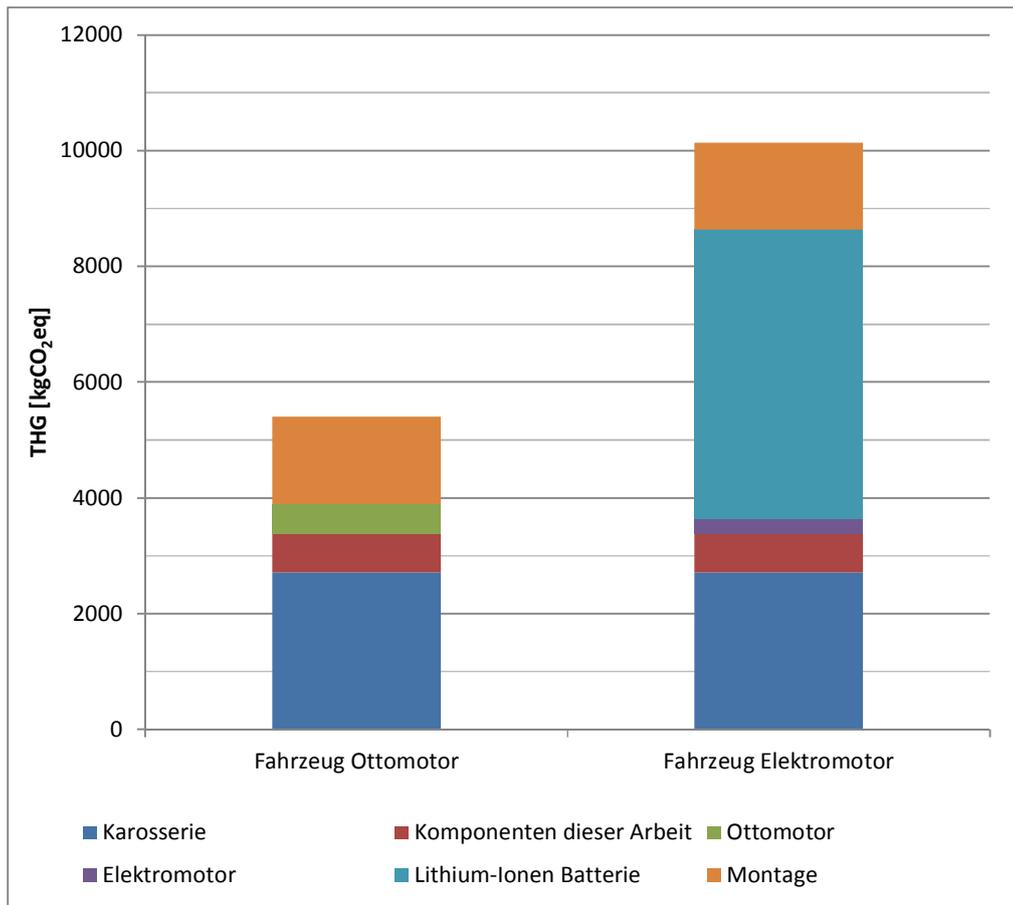


Abbildung 84: Vergleich der Treibhausgasemissionen aus der Produktion von verschiedenen Antriebskonzepten im State of Art-Szenario.³³²

9.2 Treibhausgasemissionen des Fahrzeugbetriebes

Für die gesamtheitliche Betrachtung muss neben der Produktion der Betrieb des Fahrzeugs und die dazu notwendige Energiebereitstellung berücksichtigt werden.

Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen der Energiebereitstellung des Kraftstoffs wurden Daten aus dem Report Renewability³³³ des deutschen Umweltbundesamt entnommen. Demnach betragen die Treibhausgasemissionen zur Herstellung von Benzin 54,4 gCO₂eq/kWh. Die spezifischen Treibhausgasemissionen der Kraftstoffbereitstellung ergeben sich mit 27,7 kgCO₂eq/km, berücksichtigt werden dabei ein durchschnittlicher Benzinverbrauch von 5,85 l/100km, sowie die Dichte und der Heizwert von Benzin (siehe Tabelle 51). Die spezifischen CO₂-Emissionen im Betrieb eines Mittelklasse-PKW mit Ottomotor betragen laut österreichischem Umweltbundesamt durchschnittlich 129 gCO₂/km (NEFZ). Die Daten für die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung elektrischer Energie für den

³³² Eigene Darstellung.

³³³ (Umweltbundesamt, 2013).

Gesamtheitliche Betrachtung der Treibhausgas-emissionen eines Fahrzeugs

Elektroantrieb wurden aus der Datenbank GEMIS entnommen und betragen 587,4 gCO_{2eq}/kWh. Für den elektrischen Energieverbrauch im Betrieb gibt BMW einen Wert von 12,9 kWh/100km für den BMWi3, VW für den eGolf mit 12,7 kWh/100km an (siehe Tabelle 50). Für die weitere Berechnung wird ein Mittelwert für den elektrischen Stromverbrauch von Elektrofahrzeugen mit 12,8 kWh/100km angenommen.

Hersteller	Modell	Verbrauch [kWh/100km]	Quelle:
BMW	i3	12,9	BMW ³³⁴
VW	eGolf	12,7	VW ³³⁵

Tabelle 50: Verbrauchsdaten aktueller Elektrofahrzeuge (NEFZ).³³⁶

Dadurch ergeben sich, mit Annahme eines durchschnittlichen Verbrauchs von 12,8 kWh/100km, 75,2 gCO_{2eq}/km für die elektrische Energiebereitstellung. In Tabelle 51 sind die Daten für die Berechnung der spezifischen Treibhausgasemissionen des Betriebs von Fahrzeugen mit Ottomotor und Elektroantrieb gegeben. Abbildung 85 veranschaulicht die Treibhausgasemissionen für die Nutzung von Benzin und elektrischer Energie mit dem verwendeten Strommix aus Deutschland.

	Einheit	Benzin	Quelle	Elektro	Quelle
Verbrauch	l/100km bzw. kWh/100km	5,85	Annahme ³³⁷	12,8	Annahme ³³⁸
Dichte	kg/l	0,75	(Gruden, 2008)		
Heizwert	kWh/kg	11,67			
WTT	gCO _{2eq} /kWh	54,4	Umweltbundesamt ³³⁹	587,4	GEMIS ³⁴⁰
	gCO _{2eq} /km	27,7	eig. Berechnung	75,2	eig. Berechnung
TTW	gCO ₂ /km	129	Umweltbundesamt ³⁴¹		

Tabelle 51: WTT- und TTW- Werte für die Nutzung von Benzin- und Elektromotor.³⁴²

³³⁴ Vgl. www.bmw.at/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2015/technische-daten.html; Zugriffsdatum: 10.4.2016.

³³⁵ Vgl. www.volkswagen.at/e-golf; Zugriffsdatum: 10.4.2016.

³³⁶ Eigene Darstellung.

³³⁷ Durchschnittswert (NEFZ) der untersuchten Fahrzeuge mit Otto-Motor im C-Segment aus A2Mac (OEM-Werte).

³³⁸ Durchschnittswert (NEFZ) von BMW i3 (12,9 kWh/100km) und VW eGolf (12,7 kWh/100km).

³³⁹ Vgl. (Umweltbundesamt, 2013), S. 12.

³⁴⁰ GEMIS: Datensatzname: EL-KW-Park-DE-2010.

³⁴¹ Vgl. (Umweltbundesamt, 2014), S. 7.

³⁴² Eigene Darstellung.

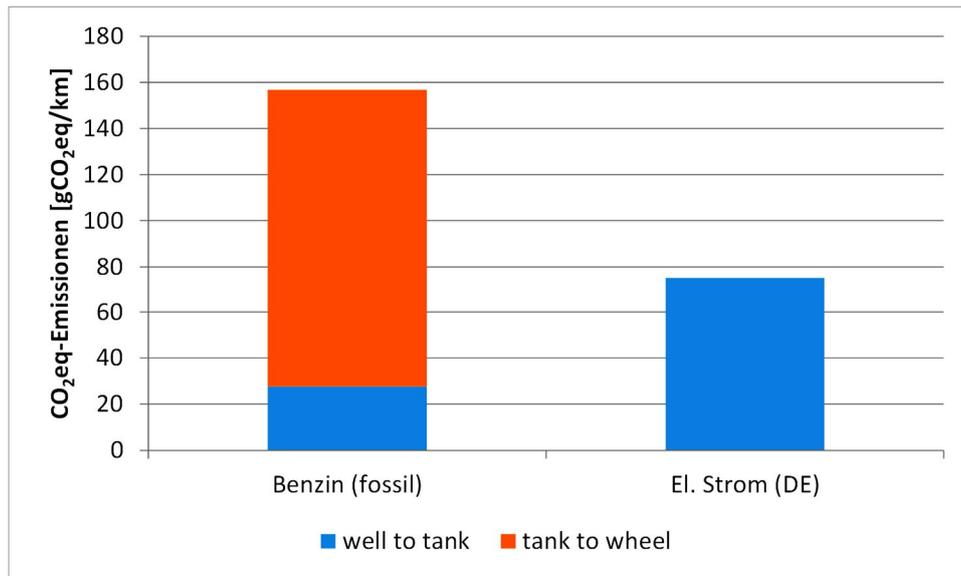


Abbildung 85: Treibhausgasemissionen aus der Energiebereitstellung der Nutzung der Antriebskonzepte.³⁴³

Anschließend erfolgt eine gesamtheitliche Bewertung der resultierenden Treibhausgasemissionen in Bezug auf die aktuelle bzw. zukünftige CO₂-Gesetzgebung.

9.3 Vergleich der CO₂-Gesetzgebung mit den resultierenden Treibhausgasemissionen einer gesamtheitlichen Betrachtung

Für den Vergleich der gesamtheitlichen spezifischen Treibhausgasemissionen mit der CO₂-Gesetzgebung wurden die Werte der Produktion und der Nutzung kombiniert. Ein Vergleich der gesamtheitlich betrachteten Treibhausgasemissionen für unterschiedliche Antriebskonzepte ist in Abbildung 86 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass das Verhältnis der Treibhausgasemissionen aus Betrieb und Produktion eines konventionellen Fahrzeugs mit Ottomotor im State of Art-Szenario deutlich durch den Betrieb (85:15) bestimmt wird. Die Treibhausgasemissionen in der Produktion von Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb betragen zwischen 11 % im Min-Szenario und 19 % im Max-Szenario der gesamtheitlich betrachteten Treibhausgasemissionen. Durchaus relevant ist im Betrieb der Anteil der Kraftstoffbereitstellung. Diese verursacht eine Erhöhung der Treibhausgasemissionen um etwa 15 %. Für ein Elektrofahrzeug betragen die Treibhausgasemissionen aus der Produktion etwa 40 % der gesamtheitlich betrachteten Treibhausgasemissionen und sind somit deutlich höher gegenüber konventionellen Fahrzeugen. Der größere Anteil der Treibhausgasemissionen, etwa 60 %, ist der Energiebereitstellung für den Betrieb des Elektrofahrzeugs geschuldet. Dieser ist abhängig vom Ort der Nutzung und somit vom Länderstrommix.

³⁴³ Eigene Darstellung.

Eine vergleichende Arbeit³⁴⁴ betrachtet die Treibhausgasemissionen von PKW mit verschiedenen Antriebskonzepten im C-Segment. Bachner berücksichtigte folgende Annahmen: Laufleistung (konventionelles Fahrzeug: 250.000 km, E-Fahrzeug: 147.303 km) und Energieverbrauch (Otto: 7,9 l/100km bzw. E-Motor: 24,7 kWh/100km mit Strommix Deutschland). Die gesamten Treibhausgasemissionen sind aufgrund dieser getroffenen Annahmen höher als die Werte der vorliegenden Untersuchung (siehe Abbildung 86).

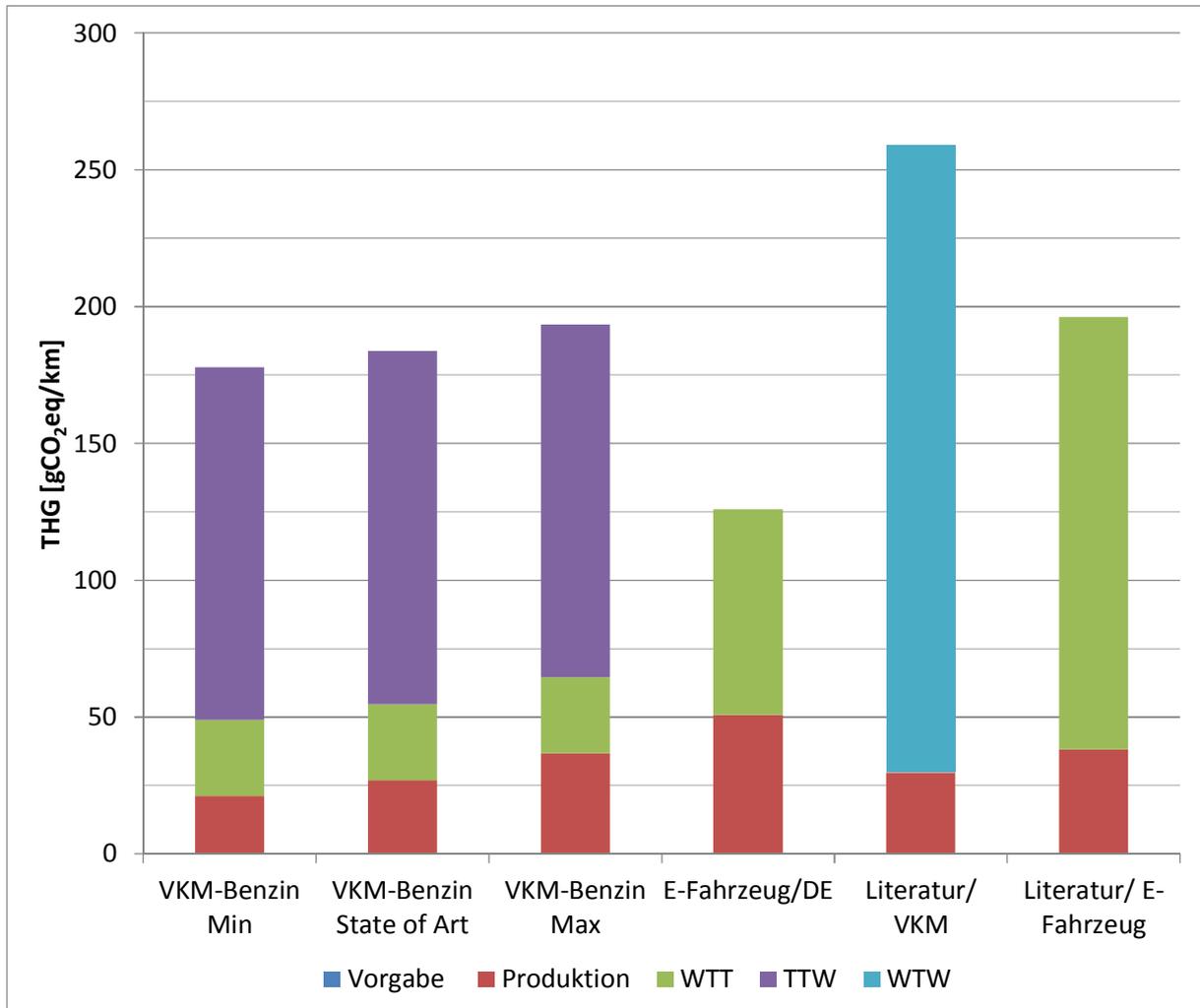


Abbildung 86: Vergleich der gesamtheitlichen Lebenszyklusemissionen eines Fahrzeugs mit Werten aus bestehender Literatur.³⁴⁵

In Abbildung 87 sind die resultierenden Treibhausgasemissionen des State of Art-Szenarios für die Produktion und den Betrieb im Bezug zur aktuellen und zukünftigen Gesetzgebung dargestellt. Damit soll der Unterschied zwischen der bereits bestehenden Gesetzgebung der CO₂-Emissionen im Betrieb des Fahrzeugs und dem gesamtheitlich betrachteten Treibhausgasemissionen veranschaulicht werden.

³⁴⁴ Vgl. (Bachner, 2011), S. 64.

³⁴⁵ Eigene Darstellung.

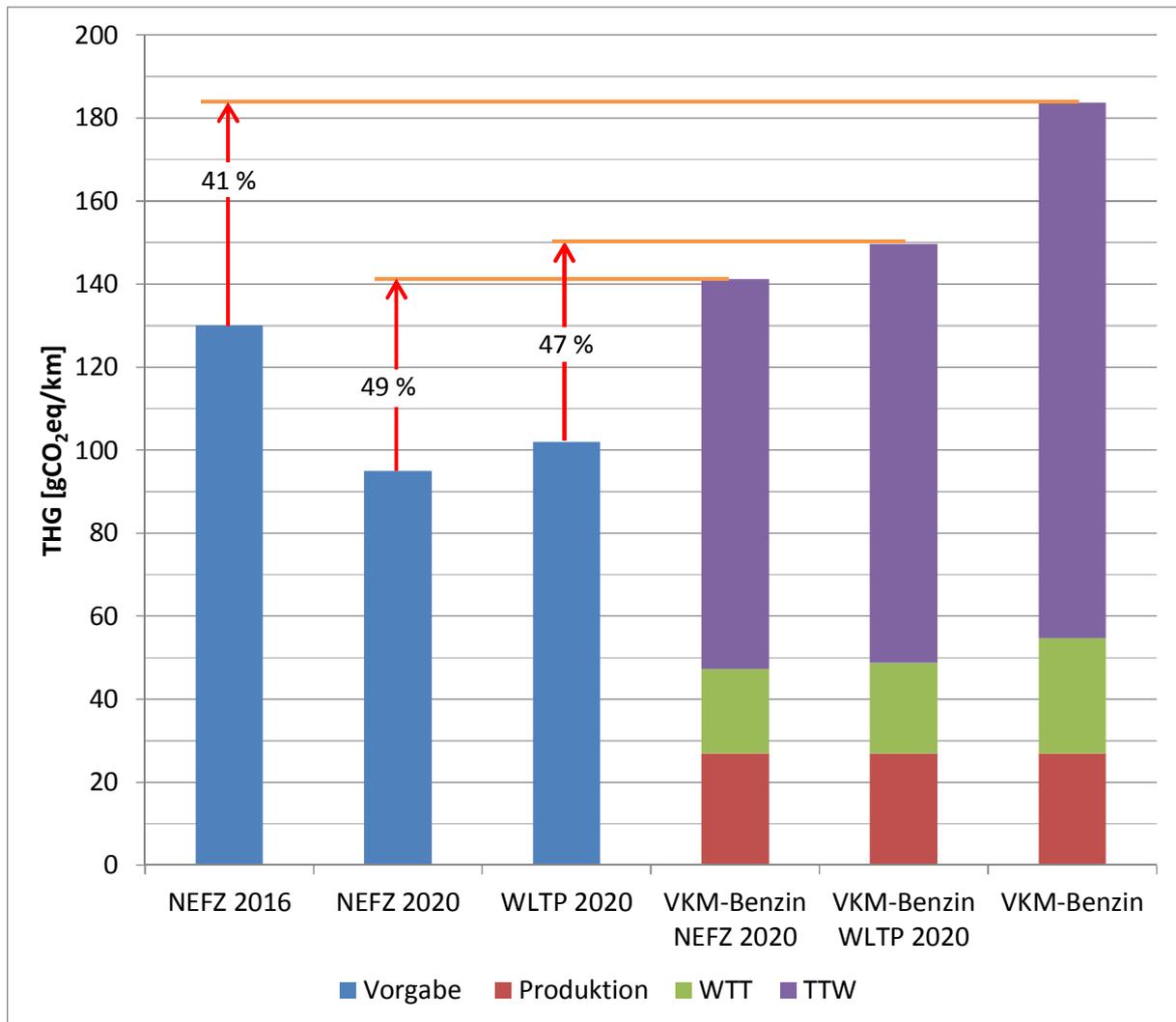


Abbildung 87: Vergleich der gesamtheitlichen Treibhausgasemissionen im State of Art-Szenario mit der CO₂-Gesetzgebung.³⁴⁶

Vor dem Hintergrund der zukünftigen Zielvorgaben des Gesetzgebers müssen die CO₂-Emissionen im Betrieb und somit der Kraftstoffverbrauch reduziert werden. Im Vergleich der gesamtheitlich betrachteten Treibhausgasemissionen im State of Art-Szenario mit der aktuellen CO₂-Gesetzgebung von 130 gCO₂/km beträgt die Differenz etwa 41 %. Ab dem Jahr 2020 gelten als Zielvorgabe 95 gCO₂/km, was einer Minderung der spezifischen CO₂-Emissionen im Betrieb von etwa 27 % gegenüber der aktuellen Gesetzgebung bedeutet. Die Differenz zwischen dieser zukünftigen Zielvorgabe und der gesamtheitlichen Treibhausgasemissionen beträgt 49 %. Wie in Kapitel 3.4.1 erwähnt wird, beträgt der Grenzwert für den WLTP 102 gCO₂/km. Auf Basis der aktuellen Gesetzgebung entspricht dieser Wert einer Minderung der spezifischen CO₂-Emissionen um etwa 21,5 %. Die Differenz zwischen dem WLTP-Grenzwert und der gesamtheitlichen Treibhausgasemissionen für einen PKW mit Ottomotor betragen 47

³⁴⁶ Eigene Abbildung.

%. Die in Abbildung 87 ersichtlichen Differenzen sollten als Denkanstoß für die Limitierung von Treibhausgasemissionen aus der Energiebereitstellung im Betrieb und der Produktion des Fahrzeugs dienen, um eine gesamtheitliche Reglementierung zu erreichen.

Conclusio

Ziel dieser Masterarbeit war die Erfassung des Potenzials gesetzlicher Lenkungseffekte hinsichtlich der möglichen Reduktion des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen in der Produktion von Fahrzeugkomponenten.

Für die Ermittlung des Energiebedarfs und der resultierenden Treibhausgasemissionen aus der Produktion muss bekannt sein, welcher Werkstoff in welcher Masse für das Fahrzeugteil verwendet wird. Hierfür wurde eine Werkstoff- und Massenbilanz für die Einzelteile der Fahrzeugkomponenten Lenkrad, Cockpit, Fahrer- und Beifahrersitz sowie Rückbank, Scheiben, Elektronikteile (ECU, Starterbatterie, Kabelbaum) und für ausgewählte Komponenten im Motorraum erstellt. Untersucht wurden 31 Fahrzeuge aus dem A-, B-, C-, kSUV-, F- und J- Segment. Ausgehend von den verwendeten Werkstoffen wurden Daten für die Gewinnung der Rohstoffe und Herstellung der Bauteile recherchiert. Als Quellen für diese Daten dienten frei zugängliche Literatur und öffentliche Datenbanken. Aus den recherchierten Produktionsdaten und der Massenbilanz wurde anschließend der gesamte Energiebedarf für die Produktion der Fahrzeugkomponenten berechnet. Um das Potenzial und den Einfluss möglicher Lenkungseffekte für die Produktion zu ermitteln, wurden anhand der Fahrzeugkomponenten Lenkrad und Cockpit zwei Lenkungseffekte untersucht. Im letzten Schritt wurden die aus der Produktion und dem Betrieb eines Fahrzeugs im C-Segment resultierenden Treibhausgasemissionen mit den Zielvorgaben seitens der Europäischen Gesetzgebung verglichen.

Für die Organisation der Produktionsdaten aus der vorliegenden Arbeit und zur Implementierung von Daten aus vorangegangenen Projekten wurde ein Modul-Generator entwickelt. Mit diesem Tool ist es möglich, unterschiedliche Fahrzeuge zu erstellen und die für die Produktion benötigte Energie und die dadurch verursachten Treibhausgasemissionen berechnen zu lassen.

Die Höhe der resultierenden Treibhausgase aus der Produktion und der Nutzung von Fahrzeugen hängt von vielen Faktoren wie der Werkstoffzusammensetzung, den Massenanteilen, verschiedenen Produktionsfaktoren wie Rezyklatanteil sowie Produktionsland hinsichtlich des Strommix und der Art des Antriebsstranges ab. So liegen die Treibhausgasemissionen eines konventionellen Fahrzeugs mit Ottomotor aufgrund der CO₂-Emissionen im Betrieb deutlich höher als jene eines Elektrofahrzeugs, welches aber deutlich höhere Treibhausgasemissionen in der Produktion aufweist.

Abschließend lässt sich sagen, dass gesetzliche Reglementierungen, wie zum Beispiel die Reglementierung des Rezyklatanteils bzw. des regenerativen Energieanteils in der

Produktion von Fahrzeugteilen durchaus sinnvoll sein können. Die Hersteller würden so gezwungen werden, gezielt auf Nachhaltigkeit in der Produktion zu setzen. So könnten Ressourcen geschont und der Energieverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen gesenkt werden.

10 Literaturverzeichnis

- Arnold, B. (2013). *Werkstofftechnik für Wirtschaftsingenieure* (Springer-Lehrbuch). *Journal of Chemical Information and Modeling* (Band 53). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-36591-1
- ATZ. (2012). Interview „Bilanzen Müssen Vergleichbar Werden“ mit Prof. Lienkamp. *ATZ*, 566–568.
- Babel, G. (2014). *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik* (3. Auflage.). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-03334-7
- Bachner, G. (2011). *Eine vergleichende Treibhausgas-Analyse von Automobilen mit elektrischem Antrieb und Verbrennungskraftmaschine mit einer Anwendung in der Verkehrspolitik*. Karl-Franzens-Universität Graz.
- Birkert, A., Haage, S. & Straub, M. (2013). *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-34670-5
- Borgeest, K. (2014). *Elektronik in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-8348-2145-4
- Braess, H.-H. & Ulrich, S. (2013). *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. (H.-H. Braess & U. Seiffert, Hrsg.) (7. Auflage Auflage). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-01691-3
- Cherubini, F., Raugei, M. & Ulgiati, S. (2008). LCA of magnesium production. *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (8-9), 1093–1100. doi:10.1016/j.resconrec.2008.05.001
- Continental. (2014). *Worldwide Emission Standards and Related Regulations*.
- DANI. (2012). *Product Environmental Declaration: Leather for clothing, upholstery, footwear, leather goods, accessories and interior design*, 0–11.
- Domininghaus, H. (2012). *Kunststoffe*. (P. Elsner, P. Eyerer & T. Hirth, Hrsg.) (8. Auflage, Band 1). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-16173-5
- Dubreuil, A., Bushi, L., Das, S., Tharumarajah, A. & Gong, X. (2010). *A Comparative Life Cycle Assessment of Magnesium Front End Autoparts*. *SAE International*. doi:10.4271/2010-01-0275
- EAA. (2013). *Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry April 2013*.
- ECCA. (2012). *2012 Sustainability Report Coil Coating*.
- Ehrenberger, S. (2013). *Life Cycle Assessment of Magnesium Components in Vehicle Construction*.
- EUROBAT, ACEA, JAMA, KAMA & ILA. (2014). *A review of battery technologies for automotive applications*.
- Europäische Union. (2002). *Verordnung (EG) NR.1400/2002*.
- Europäische Union. (2008). *Richtlinie (EG) Nr.50/2008*.

- Europäische Union. (2009). Verordnung (EG) Nr. 443/2009, 1–15.
- Europäische Union. (2014a). Verordnung (EG) Nr. 333/2014, 15–21.
- Europäische Union. (2014b). Durchführungsbeschluss der Kommission.
- Europäische Union. (2015). Durchführungsbeschluss der Kommission.
- European Automobile Manufacturers Association. (2014). *The Automobile Industry - Pocket Guide 2013*.
- Feifel, S., Walk, W. & Wursthorn, S. (2010). Die Ökobilanz im Spannungsfeld zwischen Exaktheit, Durchführbarkeit und Kommunizierbarkeit. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 46–55. doi:10.1007/s12302-009-0107-8
- Frerichs Glas GmbH. (2012). *EPD Flach-, Einscheibensicherheits- und Verbundsicherheitsglas*.
- Fung, W. & Hardcastle, M. (2001). *Textiles in automotive engineering*. Woodhead Publishing Limited. doi:10.1533/9781855738973
- Geyer, R. (2013). Life Cycle Energy and Greenhouse Gas (GHG) Assessments of Automotive Material Substitution.
- Gruden, D. (2008). *Umweltschutz in der Automobilindustrie*. Vieweg + Teubner.
- Heißing, B., Ersoy, M. & Gies, S. (2011). *Fahrwerkhandbuch*. (B. Heißing, M. Ersoy & S. Gies, Hrsg.). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Hellerich, W., Harsch, G. & Baur, E. (2010). *Werkstoff- Führer Kunststoffe* (10.Auflage Auflage). München: Carl Hanser Verlag.
- IFEU. (2011). *UMBRaLA- Grundlagenbericht*. Heidelberg.
- Ilshner, B. & Singer, R.F. (2010). *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik* (Band 1). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-01734-6
- International Energy Agency, I. (2015). CO2 Emissions from fuel combustion. *Statistics*.
- IVF. (2007). *Lot 3 Personal Computers (desktops and laptops) and Computer Monitors*.
- Jandel, A.S. & Meuthen, B. (2005). *Coil Coating* (3.Auflage Auflage). Springer Vieweg.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G. et al. (2003). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology, 324–330.
- Joseph, K. & Nithya, N. (2009). Material flows in the life cycle of leather. *Journal of Cleaner Production*, 17 (7), 676–682. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.jclepro.2008.11.018
- Kaltschmitt, M. (2015). *Umweltbewertung für Ingenieure*. (M. Kaltschmitt & L. Schebek, Hrsg.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-36989-6
- Klöpffer, W. & Grahl, B. (2014). *Life Cycle Assessment (LCA)*. Wiley-VCH.
- Koltun, P., Tharumarajah, A. & Ramakrishnan, S. (2014). Life Cycle Environmental Impact of Magnesium Automotive Components. *Essential Readings in Magnesium Technology*, (April), 175–180. doi:10.1002/9781118859803.ch29

- Maurer, P. (2013). *Life Cycle-Analyse von Antriebsstrangkomponenten für den Verkehrssektor*.
- Mock, P., Kühlwein, J., Tietge, U., Franco, V., Bandivadekar, A. & German, J. (2014). *The WLTP: How a new test procedure for cars will affect fuel consumption values in the EU*.
- Mock, P., Tietge, U., German, J., Franco, V., Bandivadekar, A., Ligterink, N. et al. (2014). *From laboratory to road*.
- Mogahzy, Y.E. El. (2009). *Engineering Textiles*. Woodhead (Band 88). Woodhead Publishing Limited.
- Mujiyanto, A. & Susetyo, P. (2010). Life Cycle Assessment on Autoliv's Driver Airbag.
- Nichigoh Communication Electric Wire. (2012). Environmental Product Declaration: For wire and cable World Wide Standard Cable, 1–11.
- Ostermann, F. (2014). *Anwendungstechnologie Aluminium*. *Journal of Chemical Information and Modeling*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-43807-7
- Österreichisches Normungsinstitut. (2006). EN ISO 14044 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitung.
- Österreichisches Normungsinstitut. (2009). EN ISO 14040 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- PlasticsEurope. (2005a). *Eco-profiles of the European Plastics Industry- Polyurethan rigid foam*.
- PlasticsEurope. (2005b). *Eco-profiles of the European Plastics Industry- Polyurethan flexible foam*.
- PlasticsEurope. (2014a). Polyamide 6.6 (PA6.6). *Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers*.
- PlasticsEurope. (2014b). Polypropylene (PP). *Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers*.
- PlasticsEurope. (2014c). High-density Polyethylene (HDPE), Low-density Polyethylene (LDPE), Linear Low-density Polyethylene (LLDPE). *Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers*, (April).
- PlasticsEurope. (2015a). Styrene Acrylonitrile(SAN) and Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS). *Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers*.
- PlasticsEurope. (2015b). Vinyl chloride (VCM) and Polyvinyl chloride (PVC). *Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers*.
- Ramakrishnan, S. & Koltun, P. (2004). Global warming impact of the magnesium produced in China using the Pidgeon process. *Resources, Conservation and Recycling*, 42 (1), 49–64. doi:10.1016/j.resconrec.2004.02.003
- Reif, K. (2011). *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik* (6. Auflage.). Vieweg + Teubner.
- Roos, E. & Maile, K. (2015). *Werkstoffkunde für Ingenieure* (Springer-Lehrbuch). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-54989-2

- RWTH Aachen. (2012). *CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020*.
- Rydh, C.J. & Sandén, B.A. (2005). Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: Performance and energy requirements. *Energy Conversion and Management*, 46 (11-12), 1957–1979. doi:10.1016/j.enconman.2004.10.003
- Schabbach, T. & Wesselak, V. (2012). *Energie* (Technik im Fokus). *Journal of Chemical Information and Modeling* (Band 53). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-24347-9
- Schaeffer, H.A. & Langfeld, R. (2014). *Werkstoff Glas*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-642-37231-5
- Schmidt, H. (2015). Worldwide Harmonized Light-Vehicles Test Procedure (WLTP) und Real Driving Emissions (RDE) – aktueller Stand der Diskussion und erste Messergebnisse. *Internationales Stuttgarter Symposium* (S. 1403–1411). doi:10.1007/978-3-658-08844-6_97
- Schneider Electric. (2010). *Product environmental profile- Harmony 9001KXR*.
- Schneider Electric. (2012a). *Product environmental profile- Harmony 9001KR-non illuminated*.
- Schneider Electric. (2012b). *Product environmental profile- Harmony 9001SKR8/9*.
- Schneider Electric. (2012c). *Product environmental profile- Harmony 9001KQ*.
- Schneider Electric. (2012d). *Product environmental profile- Harmony 9001K*L**.
- Schröder, B. (2014). *Kunststoffe für Ingenieure (essentials)*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-06399-3
- Sullivan, J.L. & Gaines, L. (2010). *A review of battery life-cycle analysis: state of knowledge and critical needs*.
- Suyang, G. & Jungjung, L. (2010). *Life Cycle Assessment on Autoliv 's Electronic Control Unit*. Chalmers University of Technology.
- Tharumarajah, A. & Koltun, P. (2010). Improving environmental performance of magnesium instrument panels. *Resources, Conservation and Recycling*, 54 (12), 1189–1195. doi:10.1016/j.resconrec.2010.03.014
- U.S. Geological Survey. (2015). Mineral Commodity Summaries 2015. *US Geological Survey*, 196. doi:10.3133/70140094
- Umweltbundesamt. (2013). *Weiterentwicklung des Analyseinstruments Renewability*.
- Umweltbundesamt. (2014). *CO₂-Monitoring Pkw 2014*.
- UNFCCC. (2014). National greenhouse gas inventory data for the period 1990-2012.
- van der Velden, N.M., Patel, M.K. & Vogtländer, J.G. (2014). LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19 (2), 331–356. doi:10.1007/s11367-013-0626-9
- VEM. (2013). *Environmental Product Declaration- Baureihe IE1-K2*.
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A. & Olschewski, I. (2009). *Strategie in der Automobilindustrie*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

- Wansart, J. (2012). *Analyse von Strategien der Automobilindustrie zur Reduktion von CO₂-Flottenemissionen und zur Markteinführung alternativer Antriebe*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-8349-4499-3
- Weißbach, W. (2012). *Werkstoffkunde* (18. Auflage). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. doi:10.1007/978-3-8348-8318-6
- WorldAutoSteel. (2010). *Life Cycle Assessment Case Study*.
- Zottler, M. (2014). *Life-Cycle Analyse von Leichtbaukonzepten für den Automobilbau*.
- AVL-PEMS: www.avl.com/-/avl-m-o-v-e-gas-pems-is; Zugriffsdatum 29.4.2016
- THE WORLD BANK: wdi.worldbank.org/table/3.7; Zugriffsdatum 3.12.2015.
- European Commission: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/index.htm>; Zugriffsdatum 25.12.2015.
- Automotive Benchmarking: www.a2mac1.com
- EPD: <http://www.environdec.com/en/Detail/epd117#.Vqs48VKRLxM>, Zugriffsdatum: 15.11.2015
- Chemie.de: www.chemie.de/lexikon/Polyurethan.html#_note-wkaiser/, Zugriffsdatum: 15.10.2015
- VW-Recycling: www.volkswagen.de/de/markenwelt/verantwortung/recycling.html, Zugriffsdatum: 12.12.2015
- BMW i: www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2015/nachhaltigkeit.html#production; Zugriffsdatum: 1.3.2016.
- ICCT: <http://eupocketbook.theicct.org/data/pc-data-segment>; Zugriffsdatum: 18.3.2016.
- Autobild.de: www.autobild.de/bilder/gebrachtwagen-golf-v-10-2008-796068.html#bild11; Zugriffsdatum: 18.3.2016.
- Auto.de: www.auto.de/magazin/fotos/30-jahre-airbag-nicht-nur-heisse-luft/page-4/; Zugriffsdatum 4.4.2016.
- ACEonline:
www.aceonline.de/fileadmin/user_uploads/Der_Club/Bilder/Lenkrad/Autotests/VW/Golf_6/ACE_10_08_S_13a_Cockpit.jpg; Zugriffsdatum: 4.4.2016.
- KHW: www.khw-techdok.de/Leistungen/Lei0-Erklaerung/Leistungen-30.htm; Zugriffsdatum 10.6.2015.
- Caledonian: www.caledonian-cables.com/product/automotive-cables/FLY.htm; Zugriffsdatum: 11.11.2015.
- SWS: www.sws.co.jp/en/product/wireharness/; Zugriffsdatum: 4.4.2016.
- Institute for Industrial Productivity: <http://ietd.iipnetwork.org/content/electric-arc-furnace>; Zugriffsdatum: 12.12.2015.

11 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Entwicklung der PKW-Anzahl zwischen 1995 und 2012.	1
Abbildung 2: Anteile klimarelevanter Gase an den Treibhausgasemissionen 2012.	5
Abbildung 3: Globale CO ₂ -Emissionen 2013 nach Sektoren.	5
Abbildung 4: CO ₂ -Emissionen 2013 in der EU nach Sektoren.	6
Abbildung 5: CO ₂ -Emissionen 2013 in Österreich nach Sektoren.	6
Abbildung 6: Zielvorgaben und Entwicklung der CO ₂ -Flottenemissionen.	7
Abbildung 7: Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ).	12
Abbildung 8: Links: innerstädtisch FTP; rechts: außerstädtischer HFET.	13
Abbildung 9: Gewichtskategorien für die Grenzwerte in Japan.	14
Abbildung 10: Japanischer JC08-Zyklus.	14
Abbildung 11: Fahrzyklus des WLTP.	15
Abbildung 12: Auswirkung des WLTP auf die Gesetzgebung.	16
Abbildung 13: Timeline für die Einführung des WLTP.	17
Abbildung 14: Links: SETAC-Dreieck von 1990; rechts: SETAC-Dreieck Erweiterung von 1993.	20
Abbildung 15: Allgemeine Darstellung eines Produktsystems einer Ökobilanz.	22
Abbildung 16: Die vier Phasen einer Ökobilanz.	23
Abbildung 17: Vereinfachter Ablauf der Sachbilanz nach ISO 14044.	24
Abbildung 18: Mögliche Wirkungskategorien und dazugehörige Schadenskategorien.	26
Abbildung 19: Prinzip der Klassifizierung und Charakterisierung in der Wirkungsabschätzung.	26
Abbildung 20: Komponenten eines VW Golf 5.	29
Abbildung 21: Analyse der Fahrzeugkomponenten im F-Segment.	31
Abbildung 22: Aufbau und Bestandteile des Cockpits eines Renault Clio 2013.	32
Abbildung 23: Masse- und Werkstoffbilanz Cockpit. (St- Stahl, MgAl-Magnesiumlegierung).	33
Abbildung 24: Links: Aufbau eines Lenkrades und rechts: Lenkrad des VW Golf VI 2009.	34

Abbildung 25: Masse- und Werkstoffbilanz des Lenkradrades. (Al: Aluminium, MgAl: Magnesiumlegierung).....	35
Abbildung 26: Aufbau des Fahrersitzes (Audi A3 1.4 TFSi Attraction).	36
Abbildung 27: Aufbau der Rückbank (BMW 118i).	36
Abbildung 28: Masse- und Werkstoffbilanz von Fahrersitzen in verschiedenen Segmenten (Sitzbezug aus Stoff bzw. Leder).	37
Abbildung 29: Masse- und Werkstoffbilanz Beifahrersitz (Sitzbezug aus Stoff bzw. Leder).....	38
Abbildung 30: Masse- und Werkstoffbilanz Rückbank (Sitzbezug aus Stoff bzw. Leder).	38
Abbildung 31: Links: Parabelförmiges Spannungsprofil des ESG nach der thermischen Behandlung; rechts: Aufbau von Verbundsicherheitsglas.	39
Abbildung 32: Masse- und Werkstoffbilanz Scheiben.	40
Abbildung 33: Motorraum eines VW Golf VI 1.4 TSi.....	40
Abbildung 34: Masse- und Werkstoffbilanz Motorraum.	41
Abbildung 35: Aufbau einer ECU (mit aufgeschnittenem Gehäusedeckel).	42
Abbildung 36: Darstellung Kabelbaum.	43
Abbildung 37: Aufbau eines Bleiakкумуляtors.	43
Abbildung 38: Massebilanz der Bordelektronik.	44
Abbildung 39: Airbags in einem modernen PKW.	44
Abbildung 40: Massenbilanz der Curtain Airbags.....	45
Abbildung 41: Energieformen.	48
Abbildung 42: Closed-loop-Recycling.....	51
Abbildung 43: Open-loop-Recycling in der Stahlproduktion.	52
Abbildung 44: Verteilung Magnesiumrohstoffabbau weltweit 2014.	57
Abbildung 45: Verteilung Primärmagnesiumproduktion weltweit 2014.	57
Abbildung 46: Ablauf des Pidgeon-Prozesses.	58
Abbildung 47: Ablauf des Elektrolyse-Prozesses.	59
Abbildung 48: Druckgussprozess für die Herstellung Magnesiumbauteile.	60
Abbildung 49: Verteilung Bauxitabbau 2013 weltweit.....	63
Abbildung 50: Verteilung Aluminiumproduktion 2013 weltweit.	64

Abbildung 51: Verteilung Eisenerzabbau 2013 weltweit.....	67
Abbildung 52: Verteilung Stahlproduktion 2013 weltweit.....	67
Abbildung 53: Ablaufschema Herstellung Stahlbauteil	68
Abbildung 54: Fahrzeugbauteile aus Rezyklat im VW Golf.	74
Abbildung 55: Schematische Darstellung des Floatverfahrens.	81
Abbildung 56: Werkstoffanteile in einer ECU in [%].....	83
Abbildung 57: Werkstoffanteile eines Bleiakkumulators in [%].	85
Abbildung 58: Werkstoffanteil eines Drehstrommotors mit 1,1 kW in [%].....	87
Abbildung 59: Werkstoffanteile der Knöpfe und Schalter in [%].	88
Abbildung 60: Werkstoffanteile in einem Fahrerairbag in [%].....	89
Abbildung 61: Beispiel: Darstellung der Produktionsszenarien.	91
Abbildung 62: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Lenkradbaugruppe.	91
Abbildung 63: Treibhausgasemissionen der Lenkradbaugruppe.	92
Abbildung 64: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Cockpitbaugruppe.	93
Abbildung 65: Treibhausgasemissionen der Cockpitbaugruppe.	93
Abbildung 66: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Sitze.	94
Abbildung 67: Treibhausgasemissionen der Sitze.	95
Abbildung 68: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Scheiben.	95
Abbildung 69: Treibhausgasemissionen der Scheiben.....	96
Abbildung 70: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Elektronik.	96
Abbildung 71: Treibhausgasemissionen Elektronik.....	97
Abbildung 72: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Motorraumkomponenten.	97
Abbildung 73: Treibhausgasemissionen der Motorraumkomponenten.....	98
Abbildung 74: Kumulierter Gesamtenergieaufwand der Curtain-Airbags.	98
Abbildung 75: Treibhausgasemissionen der Curtain-Airbags.....	99
Abbildung 76: Auszug aus Modul-Konzept für die Berechnung des Produktionsaufwandes.	101
Abbildung 77: Kumulierter Energieaufwand für die Komponenten eines generierten Fahrzeugs.	102

Abbildung 78: Treibhausgasemissionen der Komponenten für ein generiertes Fahrzeug.	103
Abbildung 79: Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Lenkradbaugruppe bei Erhöhung des Rezyklatanteil um 10%.....	105
Abbildung 80: Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Cockpitbaugruppe bei Erhöhung des Rezyklatanteils um 10%.....	106
Abbildung 81: Kumulierter Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Lenkradbaugruppe mit Strommix Norwegen und Australien	108
Abbildung 82: Kumulierter Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Cockpitbaugruppe mit Strommix Norwegen und Australien.	109
Abbildung 83: Einfluss des Schutzgases auf die Treibhausgase der Lenkradproduktion.	110
Abbildung 84: Vergleich der Treibhausgasemissionen aus der Produktion von verschiedenen Antriebskonzepten im State of Art-Szenario.	113
Abbildung 85: Treibhausgasemissionen aus der Energiebereitstellung der Nutzung der Antriebskonzepte.....	115
Abbildung 86: Vergleich der gesamtheitlichen Lebenszyklusemissionen eines Fahrzeugs mit Werten aus bestehender Literatur.	116
Abbildung 87: Vergleich der gesamtheitlichen Treibhausgasemissionen im State of Art- Szenario mit der CO ₂ -Gesetzgebung.	117

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: GWP ₁₀₀ einiger klimarelevanter Gase.	4
Tabelle 2: Berechnung der spezifischen CO ₂ -Emissionen.	9
Tabelle 3: Übergangsphase „Phase in“.	9
Tabelle 4: Begünstigungen für die Hersteller.	10
Tabelle 5: Berechnungsschema der Abgaben bei Überschreitung der spezifischen CO ₂ -Emissionen.	10
Tabelle 6: Unterschiede NEFZ-WLTC.	16
Tabelle 7: Einteilung der Fahrzeugsegmente laut EU-Kommission.	28
Tabelle 8: Verwendete Segmente mit Auflistung der untersuchten Fahrzeuge.	30
Tabelle 9: Zusammenfassung der durchschnittlichen Masse in [kg].	46
Tabelle 10: Auflistung der erfassten Massenanteile in [%].	46
Tabelle 11: Länderspezifische Werte für den Nutzungsgrad und die Treibhausgasemissionen elektrischer Energiegewinnung.	50
Tabelle 12: Parameter der verschiedenen Szenarien.	54
Tabelle 13: Produktionsdaten für die Primärmagnesiumherstellung (CN-China, AU-Australien).	62
Tabelle 14: Produktionsdaten für die Sekundärmagnesiumherstellung (US-United States).	62
Tabelle 15: LCI-Daten des Magnesiumdruckgusses.	63
Tabelle 16: Produktionsdaten für die Primäraluminiumherstellung.	65
Tabelle 17: Produktionsdaten für die Sekundäraluminiumherstellung.	65
Tabelle 18: Produktionsdaten Aluminium-Druckgussprozess.	66
Tabelle 19: Produktionsdaten für die Primärstahlherstellung.	70
Tabelle 20: Daten für die Sekundärstahlherstellung.	70
Tabelle 21: Produktionsdaten für verzinktes Stahlblech.	70
Tabelle 22: Daten für den Beschichtungsprozess.	71
Tabelle 23: Elektrischer Energieverbrauch des Beschichtungsprozesses.	71
Tabelle 24: Daten für die Metallbearbeitung.	71
Tabelle 25: Eigenschaften der verwendeten Thermoplaste.	72

Tabelle 26: Produktionsdaten für ABS.	76
Tabelle 27: Produktionsdaten für PA.....	76
Tabelle 28: Produktionsdaten für PP.....	76
Tabelle 29: Produktionsdaten für PE.....	76
Tabelle 30: Produktionsdaten für PVC.	77
Tabelle 31: Produktionsdaten für PUR.	77
Tabelle 32: Elektrischer Energieverbrauch Regranulat.	77
Tabelle 33: Produktionsdaten der Textil-Rohstoffproduktion.....	79
Tabelle 34: Produktionsdaten der Rohtextilproduktion.....	79
Tabelle 35: Produktionsdaten der Lederproduktion.....	80
Tabelle 36: LCI-Daten der Verarbeitungsschritt Schneiden und Nähen.....	80
Tabelle 37: Produktionsdaten der Rohstoffherstellung von Glas.....	82
Tabelle 38: Produktionsdaten der Herstellung von Scheiben.....	82
Tabelle 39: Produktionsdaten einer ECU.	83
Tabelle 40: Daten LCD-Display.....	84
Tabelle 41: Daten Kabelbaum.....	85
Tabelle 42: Produktionsdaten der Starterbatterie.....	86
Tabelle 43: Daten für Elektromotoren.....	87
Tabelle 44: Daten für Elektromotoren.....	87
Tabelle 45: Daten Elektrische Komponenten	89
Tabelle 46: Produktionsdaten eines Airbags.....	90
Tabelle 47: Lenkrad Reduktionspotenzial Strommix Norwegen.....	107
Tabelle 48: Cockpit Reduktionspotenzial Strommix Norwegen.....	109
Tabelle 49: Treibhausgasemissionen von Fahrzeugkomponenten.....	112
Tabelle 50: Verbrauchsdaten aktueller Elektrofahrzeuge (NEFZ).....	114
Tabelle 51: WTT- und TTW- Werte für die Nutzung von Benzin- und Elektromotor....	114
Tabelle 52: Masse- und Werkstoffbilanz Cockpit inkl. Airbag.....	3
Tabelle 53: Masse- und Werkstoffbilanz Lenkrad inkl. Airbag.....	4
Tabelle 54: Masse- und Werkstoffbilanz Fahrersitz inkl. Airbag.....	5
Tabelle 55: Masse- und Werkstoffbilanz Beifahrersitz.....	6

Tabelle 56: Masse- und Materialbilanz Rücksitze	7
Tabelle 57: Masse- und Werkstoffbilanz Scheiben.....	8
Tabelle 58: Masse- und Werkstoffbilanz Motorraumbehälter	8
Tabelle 59: Massebilanz Elektronik.....	9
Tabelle 60: Massebilanz Curtain-Airbag.....	9
Tabelle 61: Produktionsdaten für die untersuchten Fahrzeugkomponenten.	22

13 Abkürzungsverzeichnis

PKW	Personenkraftfahrzeug
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
SETAC	Society of Environment Toxicology and Chemistry
REPA	Ressource and Environmental Profile Analysis
ISO	Internationale Organisation für Normung
GWP	Global Warming Potential
PED	Primary Energy Demand
KEA	Kumulierter Energieaufwand
THG	Treibhausgasemissionen
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Test Procedure
WLTC	Worldwide Harmonized Light-Vehicles Test Cycle
RDE	Real Driving Emissions
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CH ₄	Methan
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
SF ₆	Schwefelhexafluorid
CF ₄	Tetrafluormethan
R134a	Tetrafluorethan
CO	Kohlenmonoxid
HC	Kohlenwasserstoffe
NO _x	Stickstoffoxide
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
PUR	Polyurethan
PE/HDPE	Polyethylen/High Density Polyethylen
PET	Polyester
PA	Polyamid/Nylon
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
PVB	Polyvinyl-Butyral
IM	Injection Molding
ESG	Einscheibensicherheitsglas
VSG	Verbundsicherheitsglas
EPD	Environmental Product Declaration
ECU	Electronic Control Unit

14 Formelverzeichnis

(1) Kumulierter Energieaufwand.....	48
(2) Berechnung der elektrischen Energiebedarfs	48
(3) Berechnung kumulierter Energieaufwand mit elektrischer Energie.....	49
(4) Zusammensetzung der Treibhausgasemissionen.....	49
(5) Berechnung des Energiebedarfs der Produktion (closed loop).....	51
(6) Berechnung der Treibhausgasemissionen der Produktion (closed loop)	51
(7) Berechnung des Energiebedarfs der Produktion (open loop)	52
(8) Berechnung der Treibhausgasemissionen der Produktion (open loop)	52
(9) Berechnung des Energiebedarfs eines Bauteils	53
(10) Berechnung der Treibhausgasemissionen eines Bauteils	53
(11) Berechnung des Energiebedarfs der Fahrzeugkomponenten.....	53
(12) Berechnung der Treibhausgasemissionen der Fahrzeugkomponenten.....	53

15 Formelzeichen

M [kg]	durchschnittliche Masse der Flotten-PKW
M_0 [kg]	Bezugsmasse
a	Faktor für die Berechnung der spezifischen CO ₂ -Emissionen
x [gCO ₂ /km]	Höhe der Grenzwertüberschreitung
n_{neuPKW}	Anzahl der neu zugelassenen PKW
KEA [MJ/kg]:	kumulierter Energieaufwand
$KEA_{nicht-reg}$ [MJ/kg]:	kumulierter Energieaufwand aus nicht regenerativen Energieträgern
KEA_{reg} [MJ/kg]:	kumulierter Energieaufwand aus regenerativen Energieträgern
E_{el} [kWh _{Strom} /kg]:	elektrische Energie
$E_{el\%}$ [%]:	Anteil elektrischer Energie am KEA
g_{el} [kWh/kWh _{Strom}]:	Nutzungsgrad der elektrischen Energiegewinnung
KEA_f [MJ/kg]:	kumulierter Energieaufwand fossiler Energieträger, welche nicht zu Stromgewinnung genutzt werden
THG [kgCO _{2eq} /kg]:	Masse Treibhausgasemissionen
$K_{CO_{2eq-f}}$ [kgCO _{2eq} /MJ]:	Faktor für die Emissionen durch die fossile Energieträger
$K_{CO_{2eq-el}}$ [kgCO _{2eq} /kWh _{Strom}]:	Faktor für die Emissionen durch die elektrische Energie
KEA_{Komp} [MJ]:	Gesamter Primärenergiebedarf der Herstellung einer Fahrzeugkomponente
KEA_{Teil} [MJ]:	Gesamter Primärenergiebedarf der Herstellung eines Bauteils
KEA_H [MJ/kg]:	Gesamter Primärenergiebedarf der Herstellung
KEA_{prim} [MJ/kg]:	kumulierter Energieaufwand Primärrohstoffherstellung
KEA_{sec} [MJ/kg]:	kumulierter Energieaufwand Sekundärrohstoffherstellung
KEA_{rec} [MJ/kg]:	kumulierter Energieaufwand Sekundärrohstoffherstellung durch „Inhouse Recycling“
KEA_{prod} [MJ/kg]:	kumulierter Energieaufwand Produktherstellung
THG_{Komp} [MJ]:	Gesamte Treibhausgasemissionen der Herstellung einer Fahrzeugkomponente
THG_{Teil} [MJ]:	Gesamte Treibhausgasemissionen der Herstellung eines Bauteils
THG_H [kgCO _{2eq} /kg]:	Gesamte Treibhausgasemissionen der Herstellung
THG_{prim} [kgCO _{2eq} /kg]:	Treibhausgasemissionen der Primärrohstoffherstellung
THG_{seg} [kgCO _{2eq} /kg]:	Treibhausgasemissionen der Sekundärrohstoffherstellung

THG_{rec} [MJ/kg]:	Treibhausgasemissionen der Sekundärrohstoffherstellung durch „Inhouse Recycling“
THG_{prod} [kgCO _{2eq} /kg]:	Treibhausgasemissionen der Produktherstellung
k_{rec} [%]:	Anteil des Produktionsabfalls für „Inhouse Recycling“
k_{roh} [%]:	Anteil des Produktionsabfalls „open loop“
X_{RR} [%]:	Rezyklatanteil
m_{Teil} [kg]:	Masse des Bauteils [kg]

Anhang A (Typbezeichnung der untersuchten Fahrzeuge)

A-Segment

- Fiat Panda 1.3 Multijet Lounge
- Opel Adam 1.4 Ecoflex Jam
- Toyota Aygo 1.0 VVTi Xplay
- VW Up! 1.0 TakeUp!
- VW Up! eUp!

B-Segment

- Alfa Romeo Mito 1.4 T Elegante 2009
- Audi A1 1.4 TFSi Stronic Ambition
- BMW i3 Range Extender Urban Life
- Renault Clio 0.9 TCe Dynamique
- Suzuki Swift 1.2 GTX
- VW Polo 1.6 TDi Trend

C-Segment

- Alfa Romeo Giulietta 1.4 Tb MultiAir Distinctive
- Audi A3 1.4 TFSi Attraction
- BMW 1 Series 118i 2011
- Citroen C4 1.6 e_HDi Exclusive
- Ford Focus 1.6 EcoBoost Titanium 2011
- Mazda 3 1.6 MZ CD Sport
- Mercedes B class 200 BE
- Mini Countryman 1.6 CooperD All4
- Opel Astra 1.4T Cosmo
- Peugeot 308 II 1.6 e-HDi Allure
- VW Golf VI 1.4 TSi

F-Segment

- Audi A7 2.8 FSi Quattro

- Audi A8 4.2 FSi
- BMW 7 Series 740i

kSUV

- Audi Q3 2.0 TFSi Base 2012
- BMW X1 xDrive 23d 2010
- Dacia Duster 1.5

J

- BMW X5 xDrive 30d F15
- Porsche Cayenne Turbo
- VW Touareg 3.0 TDi

Anhang B (Massen- und Werkstoffbilanz untersuchter Baugruppen)

Cockpit

Segment	A	B		C		kSUV	F		J	
Werkstoff	m [kg]	m [kg]		m [kg]		m [kg]	m [kg]		m [kg]	
Stahl	7,45	8,97	-	7,25	-	8,00	7,45	-	9,35	-
MgAl	-	-	5,02	-	5,63	-	-	5,15	-	5,04
PP	6,80	9,63	9,63	11,82	11,82	7,46	8,39	8,39	10,9	10,9
ABS-PC	1,39	1,00	1,00	1,29	1,29	4,82	4,93	4,93	4,43	4,43
Airbag	1,45	1,77	1,77	1,85	1,85	1,91	2,05	2,05	2,19	2,19
Elekt. Komponenten	2,20	2,14	2,14	2,41	2,41	2,53	4,52	4,52	3,60	3,60
Total	19,29	23,5	19,55	24,62	23	24,73	27,34	25,04	30,47	26,16

Tabelle 52: Masse- und Werkstoffbilanz Cockpit inkl. Airbag

Lenkrad

Segment	A		B		C	kSUV	F	J
Werkstoff	m [kg]		m [kg]		m [kg]	m [kg]	m [kg]	m [kg]
MgAl	0,55	-	0,55	-	0,55	0,55	0,55	0,55
Al	-	0,74	-	0,74	-	-	-	-
PUR	0,82	0,5	0,74	0,62	0,77	0,81	0,78	0,78
ABS-PC/PP	0,13	0,13	0,12	0,12	0,09	0,06	0,05	0,02
Stoff/Leder	-	-	-	-	-	-	0,24	0,1
Airbag	0,95	0,95	1,16	1,16	1,08	1,22	1,51	1,56
Elekt. Komponenten	0,07	0,07	0,09	0,09	0,21	0,04	0,1	0,01
Total	2,52	2,39	2,66	2,73	2,7	2,68	3,23	3,12

Tabelle 53: Masse- und Werkstoffbilanz Lenkrad inkl. Airbag

Fahrersitz

Segment	A	B	C		kSUV	F		J	
Werkstoff	m [kg]	m [kg]	m [kg]		m [kg]	m [kg]		m [kg]	
Stahl	13,74	16,23	14,64	14,64	16,06	17,24	17,24	18,88	18,88
PUR	2,73	2,77	2,78	2,78	2,88	3,26	3,26	2,85	2,85
Stoff	1,18	1,12	1,35	-	1,06	1,2	-	1,06	-
Leder	-	-	-	2,04	-	-	2,58	-	2,25
PP	0,36	0,8	1,35	1,35	0,7	1,82	1,82	0,63	0,63
ABS-PC	-	0,13	0,04	0,04	-	1,62	1,62	0,41	0,41
PA	-	0,05	0,05	0,05	0,05	0,65	0,65	1,09	1,09
PE	0,22	0,24	0,26	0,26	0,36	-	-	0,13	0,13
Kabelbaum	0,05	0,06	0,27	0,27	0,11	0,66	0,66	0,36	0,36
Elekt. Komponenten	-	-	0,04	0,04	-	0,21	0,21	0,03	0,03
Airbag	0,63	0,53	0,49	0,49	0,66	0,49	0,49	0,58	0,58
Elekt. Motoren	-	-	0,24	0,24	-	1,28	1,28	1,46	1,46
Total	18,92	21,93	22,13	22,82	21,86	30,21	31,59	27,56	28,75

Tabelle 54: Masse- und Werkstoffbilanz Fahrersitz inkl. Airbag

Beifahrersitz

Segment	A	B	C		kSUV	F		J	
Werkstoff	m [kg]	m [kg]	m [kg]		m [kg]	m [kg]		m [kg]	
Stahl	13,23	15,09	14,64	14,64	15,63	17,70	17,70	18,54	18,54
PUR	2,73	2,76	2,77	2,77	2,81	2,97	2,97	2,86	2,86
Stoff	1,18	1,14	1,35	-	1,06	1,2	-	1,06	-
Leder	-	-	-	2,08	-	-	2,57	-	2,26
PP	0,36	0,81	1,38	1,38	1,10	2,05	2,05	0,89	0,89
ABS-PC	-	0,13	0,13	0,13	0,08	0,97	0,97	0,21	0,21
PA	-	0,05	0,02	0,02	-	0,18	0,18	1,49	1,49
PE	0,22	0,24	0,26	0,26	0,36	-	-	0,13	0,13
Kabelbaum	0,05	0,06	0,19	0,19	0,10	0,65	0,65	0,35	0,35
Elekt. Komponenten	-	-	0,04	0,04	-	0,25	0,25	0,04	0,04
Airbag	0,63	0,59	0,49	0,49	0,65	0,49	0,49	0,59	0,59
Elekt. Motoren	-	-	0,24	0,24	-	1,28	1,28	1,46	1,46
Total	18,4	20,8	20,73	21,46	21,78	27,74	29,11	27,61	28,81

Tabelle 55: Masse- und Werkstoffbilanz Beifahrersitz

Rücksitze

Segment	A	B	C		kSUV	F		J
Werkstoff	m [kg]	m [kg]	m [kg]		m [kg]	m [kg]		m [kg]
Stahl	11,27	13,38	14,81	14,81	16,74	19,13	19,13	28,91
PUR	4,57	5,11	5,64	5,64	6,94	7,28	7,28	8,13
Stoff	1,23	2,13	2,37	-	2,26	2,64	-	2,09
Leder	-	-	-	3,4	-	-	4,97	-
PP	-	0,57	0,425	0,425	-	-	-	-
ABS-PC	-	0,11	-	-	0,54	2,94	2,94	1,18
PE	0,85	0,56	0,73	0,73	0,45	0,81	0,81	1,00
Total	17,93	21,87	23,97	24,99	26,92	32,81	35,14	41,32

Tabelle 56: Masse- und Materialbilanz Rücksitze

Scheiben

Segment	A	B	C	kSUV	F	J
Werkstoff	m [kg]					
Verbundsicherheitsglas	11,56	11,43	12,93	12,06	14,27	13,84
Einscheibensicherheitsglas	21,21	18,50	19,37	17,95	27,01	30,85
Total	32,77	29,93	32,30	30,00	41,28	44,69

Tabelle 57: Masse- und Werkstoffbilanz Scheiben

Motorraum

Segment	A	B	C	kSUV	F	J
Werkstoff	m [kg]					
PP	2,59	2,37	2,82	2,97	1,55	4,71
PA	0,41	0,73	0,71	0,86	3,32	1,39
Total	3,00	3,10	3,53	3,83	4,87	6,09

Tabelle 58: Masse- und Werkstoffbilanz Motorraumbehälter

Elektronik

Segment	A	B	C	kSUV	F	J
Komponente	m [kg]					
Batterie	14,83	17,57	22,14	21,76	29,32	30,22
Kabelbaum	11,87	15,11	18,50	17,00	32,11	34,71
ECUs	0,95	1,14	1,96	1,52	3,95	3,38
Total	27,65	33,82	42,60	40,27	65,38	68,31

Tabelle 59: Massebilanz Elektronik

Curtain-Airbag

Segment	A	B	C	kSUV	F	J
Komponente	m [kg]					
Kopfairbag (Curtain-Airbag)	1,71	2,19	2,11	2,02	2,41	2,88

Tabelle 60: Massebilanz Curtain-Airbag

Anhang C

Anmerkung: Um regionale Unterschiede in der Produktion darzustellen, bezieht sich der Index „_x“ der Formelzeichen auf das Land des ausgewählten Strommix.

Berechnungsschema Produktion Magnesiumkomponenten

Primärmagnesiumherstellung (Rohstoffgewinnung bis Rohmagnesiumbarren, Cradle to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{pri,x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{pri,x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Verfahren/ Land	Quellen
358,077	-	34,8	Pidgeon/CN	GaBi6
193,96	10,16	25,8	Pidgeon/CN	Ehrenberger, Simone (2013).
366	13,013	41,28	Pidgeon/CN	Cherubini, Francesco u.a. (2008).
354,5	13,38	42,1	Pidgeon/CN	Ramakrishnan, S. und Koltun, P. (2004).
272	16,62	24,5	Elektrolyse/AU	Cherubini, Francesco u.a. (2008).

Sekundärmagnesiumherstellung (Magnesiumschrott zu Magnesiumbarren, Gate to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{sek,x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{sek,x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Verfahren/ Land	Quellen
25,06	2,09	1,77	US	Koltun, P. u.a (2014)

Magnesiumdruckguss inkl. „Inhouse-Recycling“ (Gate to Gate)

$$KEA_{prod,x} = E_{el} \cdot g_{el,x}$$

$$THG_{prod,x} = THG - E_{el} \cdot (K_{CO_2eqel} - K_{CO_2eqel,x})$$

E _{el} [MJ/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Schutzgas	Quellen
0,55+0,88+0,33		-	Ehrenberger, Simone (2013)
0,55		„Inhouse Recycling“	
	47,82	SF6	
	1,27	R134a	

Produktionsdaten Magnesiumbauteil: (Cradle to Gate)

$$KEA_{Mg,x} = m_{Teil-Mg} \cdot ((KEA_{pri,x} \cdot (1 - X_{RR}) + KEA_{sek,x} \cdot X_{RR}) + KEA_{prod,x})$$

$$THG_{Mg,x} = m_{Teil-Mg} \cdot ((THG_{pri,x} \cdot (1 - X_{RR}) + THG_{sek,x} \cdot X_{RR}) + THG_{prod,x})$$

GaBi6: Datensatzname: Magnesium; Pidgeon process, primary production; production mix, at plant:

Berechnungsschema Produktion Aluminiumkomponenten

Primäraluminiumherstellung (Rohstoffgewinnung bis Aluminiumbarren, Cradle to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{pri,x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{pri,x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Verfahren/ Land	Quellen
156	15,5	8,48	-/EU	EAA (2013)

Sekundäraluminiumherstellung (Aluminiumschrott zu Aluminiumbarren, Gate to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{sek,x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{sek,x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Verfahren/ Land	Quellen
8,54	0,522	0,507	-/EU	EAA (2013)

Aluminiumdruckgussprozess inkl. „Inhouse-Recycling“ (Gate to Gate)

$$KEA_{prod,x} = E_{el} \cdot g_{el,x}$$

$$THG_{prod,x} = E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

E _{el} [kWh/kg]	Anmerk.	Quellen
0,55+0,88+0,33		Ehrenberger (2013)
0,55	„Inhouse Recycling“	

Produktionsdaten Aluminiumbauteil: (Cradle to Gate)

$$KEA_{Al,x} = m_{Teil-Al} \cdot ((KEA_{pri,x} \cdot (1 - X_{RR}) + KEA_{sek,x} \cdot X_{RR}) + KEA_{prod,x})$$

$$THG_{Al,x} = m_{Teil-Al} \cdot ((THG_{pri,x} \cdot (1 - X_{RR}) + THG_{sek,x} \cdot X_{RR}) + THG_{prod,x})$$

Berechnungsschema Produktion Stahlkomponenten

Primärstahlherstellung (Rohstoffgewinnung bis Stahlprodukt, Cradle to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{pri,x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{pri,x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk/Datensatznamen	Quellen
23,56	0,91	1,98	Steel cold rolled coil; BF route; production mix, at plant; <1,5 mm/DE	GaBi6
21,5	0,85	2,29	Metall\Stahl-Coils-Kaltwalz-EU-2005/EU	GEMIS
12,06	0,6	1,16	Metall\Stahl-Profile-EU-2005/EU	GEMIS

Sekundärstahlherstellung (Gate to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{sek,x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{sek,x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Quellen
6,35		0,507	Geyer (2013)
	0,35		http://ietd.iipnetwork.org/content/electric-arc-furnace

Stahlblechbeschichtungprozess (Gate to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{Beschichtung,x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{Beschichtung,x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerkung	Quellen
3,13		0,225		Eigene Berechnung, siehe (Kapitel 6.3.3.6)
	0,027		elektr. Energieverbrauch	ECCA (2012)



Stahlbearbeitung: Stanzen/Biegen und Tiefziehen (Gate to Gate)

$$KEA_{stanz,x} = E_{el} \cdot g_{el,x}$$

$$THG_{stanz,x} = E_{el} \cdot K_{CO_2eq_{el},x}$$

$$KEA_{tief,x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{tief,x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eq_f} + E_{el} \cdot K_{CO_2eq_{el},x}$$

$$KEA_{prod,x} = 2 \cdot KEA_{stanz,x} + KEA_{tief,x}$$

$$THG_{prod,x} = 2 \cdot THG_{stanz,x} + THG_{tief,x}$$

Annahme:
Produktionsprozess besteht aus 3 Schritten (Stanzen/Biegen, Tiefziehen, Stanzen/Biegen),

KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk./Datensatzname	Quellen
	0,05		Steel sheet stamping and bending (5% loss); technology mix; single route, at plant	GaBi6
2,98	0,28	0,18	Steel sheet deep drawing (multi-level); technology mix; single route, at plant	GaBi6

Produktionsfaktoren Stahlbearbeitung (Berücksichtigung der Produktionsabfälle)

$$k_{roh} = 2 - X_{FY}$$

Prozess	X _{FY} [%]	Quellen
Stanzen, Biegen	0,95	GaBi6
Tiefziehen	0,71	WorldAutoSteel (2011)
	0,4	GaBi6



Produktionsdaten Stahlbauteil: (Cradle to Gate)

$$KEA_{St,x} = m_{Teil-St} \cdot ((KEA_{pri,x} \cdot (1 - X_{RR}) + KEA_{sek,x} \cdot X_{RR}) \cdot k_{roh} + KEA_{Beschichtung,x} + KEA_{prod,x})$$

$$THG_{St,x} = m_{Teil-St} \cdot ((THG_{pri,x} \cdot (1 - X_{RR}) + THG_{sek,x} \cdot X_{RR}) \cdot k_{roh} + THG_{Beschichtung,x} + THG_{prod,x})$$

Berechnungsschema Produktion Kunststoffkomponenten

Primärkunststoffherstellung (Rohstoffgewinnung bis Kunststoffgranulat, Cradle to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{pri,x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{pri,x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

Anmerk.: Für die weitere Berechnung werden die Mittelwerte der Daten der unterschiedlichen Kunststoffe verwendet.

	KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quellen
ABS	89,56		3,17	Granulat/DE	GaBi6
	92,31		3,6	US	GREET2014
	92,18	0,29	3,1	EU	PlasticsEurope (2015a)
PA	127,8		7,0	US	GREET2014
	139,5	1,11	6,4	EU	PlasticsEurope (2014a)
PP	69,97		1,73	Granulat/DE	GaBi6
	65,47		1,91	US	GREET2014
	77,9	0,35	1,63	EU	PlasticsEurope (2014b)
PE	69,52		1,6	Granulat/DE	GaBi6
	69,04		2,1	US	GREET2014
	80,2	0,43	1,8	EU	PlasticsEurope (2014c)
PVC	57,31		2,13	Granulat/DE	GaBi6
	52,1		2,38	US	GREET2014
	60,7	0,51	2,0	EU	PlasticsEurope (2015b)

Primär- Polyurethanschaumherstellung (Rohstoffgewinnung bis PUR-Schaum, Cradle to Gate)
Produktion durch Reaction-Injection Molding (RIM)

	KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quellen
PUR	102,14	6,5	4,7	flexible foam/EU	PlasticsEurope (2005b)
	101,5	6,0	3,5	rigid foam/EU	PlasticsEurope (2005a)

Sekundärkunststoffherstellung/ Regranulierung (Gate to Gate)

$$KEA_{rec,x} = E_{el} \cdot g_{el,x}$$

$$THG_{rec,x} = E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

E _{el} [kWh/kg]	Verfahren/ Land	Quellen
0,092	-/DE	GaBi6

Spritzgussprozess (Granulat zum Spritzgussteil, Gate to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{prod,x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{prod,x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

	KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quellen
ABS	19,61	0,8	1,0	US	GREET2014
PA	24,54	0,8	1,48	US	
PP	15,88	0,8	0,77	US	
PE	19,09	2,0	1,32	US	
PVC	12,04	1,23	0,85	US	

Produktionsdaten Kunststoffbauteil: (Cradle to Gate)

$$KEA_{KS_x} = m_{Teil-KS} \cdot ((KEA_{pri_x} \cdot (1 - X_{RR}) + KEA_{rec_x} \cdot X_{RR}) + KEA_{rec_x} \cdot k_{rec} + KEA_{prod_x})$$

$$THG_{KS_x} = m_{Teil-KS} \cdot ((THG_{pri_x} \cdot (1 - X_{RR}) + THG_{rec_x} \cdot X_{RR}) + THG_{rec_x} \cdot k_{rec} + THG_{prod_x})$$

Produktionsdaten PUR-Teile Reaction Injection Molding (RIM): (Cradle to Gate)

$$KEA_{PUR_x} = m_{Teil-PUR} \cdot KEA_{pri_x}$$

$$THG_{PUR_x} = m_{Teil-PUR} \cdot THG_{pri_x}$$

Berechnungsschema Produktion Textilien

Rohstoffproduktion:

$$K_{CO_2eq_f} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eq_{el}}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{RS_x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el_x} - g_{el})$$

$$THG_{RS_x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eq_f} + E_{el} \cdot K_{CO_2eq_{el_x}}$$

Cotton -Rohstoffproduktion (Rohstoffgewinnung bis Cotton-Faser, Cradle to Gate)

	KEA [MJ/kg]	E _{el} [MJ/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quellen
Cotton	50,4	0,91	3,76	150dtex/EU	Van der Velden/ Patel/ Vogtläder(2014)

Synthetikfaser-Rohstoffproduktion (Rohstoffgewinnung bis Granulat, Cradle to Gate)

	KEA [MJ/kg]	E _{el} [MJ/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quellen
PET	78,4	0,43	2,7	70dtex/EU	Van der Velden/ Patel/ Vogtläder(2014)
PA	129,7	1,11	8,64	70dtex/EU	
PP	70,04	0,35	1,73	70dtex/EU	

Cotton-Rohstextilproduktion (Cotton-Faser bis Rohstextil, Gate to Gate)

$$K_{CO_2eq_f} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eq_{el}}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{TP_x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el_x} - g_{el})$$

$$THG_{TP_x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eq_f} + E_{el} \cdot K_{CO_2eq_{el_x}}$$

Prozess	KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quellen
Spinnen	72,9	6,73	3,4	150dtex/EU	Van der Velden/ Patel/ Vogtläder(2014)
Weben	106,9	9,87	4,98		
Vorbehandlung	27,1	0,5	1,26		
Total	206,9	17,1	9,64		

Synthetische-Rohstextilproduktion (Kunststoffgranulat bis Rohstextil, Gate to Gate)

$$K_{CO_2eq_f} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eq_{el}}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{TP_x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el_x} - g_{el})$$

$$THG_{TP_x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eq_f} + E_{el} \cdot K_{CO_2eq_{el_x}}$$

	Prozessschritte	KEA [MJ/kg]	E _{el} [MJ/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quellen
PET, PA, PP	Extruder Spinnng	19,2	1,7	0,9		Van der Velden/ Patel/ Vogtläder(2014)
	Texturing	10,8	1	0,5		
	Weben	229,1	21,1	10,67		
	Vorbehandlung	19,5		0,9		
	Total	278,6	23,8	12,97		

Textilbearbeitung: Schneiden/Nähen (Gate to Gate)

$$KEA_{prod_x} = E_{el} \cdot g_{el_x}$$

$$THG_{prod_x} = E_{el} \cdot K_{CO_2eq_{el_x}}$$

E _{el} [kWh/m ²]	Anmerk.	Quellen
1,53	Cutting and Sewing	GaBi6

Lederproduktion (Aufzucht der Rinder bis Rohleder, Cradle to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{Rohleder_x} = KEA$$

$$THG_{Rohleder_x} = THG$$

$$KEA_{Lederherst_x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el_x} - g_{el})$$

$$THG_{Lederherst_x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel_x}$$

KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quellen
25,88	-	12,15	Rohleder/IT	DANI (2012)
31,21	2,8	1,77	Verarbeitung/IT	

Textilbearbeitung: Schneiden/Nähen (Gate to Gate)

$$KEA_{prod_x} = E_{el} \cdot g_{el_x}$$

$$THG_{prod_x} = E_{el} \cdot K_{CO_2eqel_x}$$

E _{el} [kWh/m ²]	Anmerk.	Quellen
1,53	Cutting and Sewing	GaBi6

Produktionsdaten Textilteil/Sitzbezug: (Cradle to Gate)

$$KEA_{Tex_x} = m_{Teil-Tex} \cdot (KEA_{RS_x} \cdot k_{roh} + KEA_{TP_x} + KEA_{prod_x})$$

$$THG_{Tex_x} = m_{Teil-Tex} \cdot (THG_{RS_x} \cdot k_{roh} + THG_{TP_x} + THG_{prod_x})$$

$$KEA_{Leder_x} = m_{Teil-Leder} \cdot (KEA_{RohLeder_x} + KEA_{Lederherst_x} + KEA_{prod_x})$$

$$THG_{Leder_x} = m_{Teil-Leder} \cdot (THG_{RohLeder_x} + THG_{Lederherst_x} + THG_{prod_x})$$

Berechnungsschema Produktion Scheiben

Rohstoffgewinnung (Rohstoffgewinnung, Cradle to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{RohESG_x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{RohESG_x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

$$KEA_{RohVSG_x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{RohVSG_x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quellen
4,088	0,073	0,348	ESG/EU	Frerichs Glas GmbH
3,90	0,07	0,336	VSG/EU	(2012)



Scheibenherstellung (Rohstoffen bis zum ESG/VSG, Gate to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{HESG_x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{HESG_x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

$$KEA_{HVSG_x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{HVSG_x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

KEA [MJ/kg]	E _{el} [kWh/kg]	THG [kgCO ₂ eq/kg]	Anmerk.	Quellen
22,3	1,45	1,11	ESG/EU	Frerichs Glas GmbH
26,9	1,68	1,832	VSG/EU	(2012)

Produktionsdaten Scheiben: (Cradle to Gate)

$$KEA_{ESG_x} = m_{Teil-ESG} \cdot (KEA_{RohESG_x} + KEA_{HESG_x})$$

$$THG_{ESG_x} = m_{Teil-ESG} \cdot (THG_{RohESG_x} + THG_{HESG_x})$$

$$KEA_{VSG_x} = m_{Teil-VSG} \cdot (KEA_{RohVSG_x} + KEA_{HVSG_x})$$

$$THG_{VSG_x} = m_{Teil-VSG} \cdot (THG_{RohVSG_x} + THG_{HVSG_x})$$

Berechnungsschema Produktion Elektronikteile

LCD-Display: Annahme: LCD Display mit 68 kg/m²

LCD-Display (Rohstoffherstellung, Cradle to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{RohLCD_x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{RohLCD_x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

KEA [MJ/m ²]	E _{el} [kWh/m ²]	THG [kgCO ₂ eq/m ²]	Anmerk.	Quellen
9157	3982	508	Rohstoffherstellung	IVF (2007)

LCD-Display (Verarbeitung der Rohstoffe zum Display, Gate to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{KEA - E_{el} \cdot g_{el}}$$

$$KEA_{HLCD_x} = KEA + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{HLCD_x} = (KEA - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

KEA [MJ/m ²]	E _{el} [kWh/m ²]	THG [kgCO ₂ eq/m ²]	Anmerk.	Quellen
1634	843	94	LCD-Herstellung	IVF (2007)

Produktionsdaten LCD-Display: (Cradle to Gate)

$$KEA_{LCD_x} = m_{Teil-LCD} \cdot (KEA_{RohLCD_x} + KEA_{HLCD_x})$$

$$THG_{LCD_x} = m_{Teil-LCD} \cdot (THG_{RohLCD_x} + THG_{HLCD_x})$$

Starterbatterie:

Starterbatterie Bleiakкумулятор (Rohstoffherstellung und Produktion, Cradle to Gate)

$$K_{CO_2eqf} = \frac{THG - E_{el} \cdot K_{CO_2eqel}}{(KEA_{Roh} + KEA_{Prod}) - E_{el} \cdot g_{el}} \quad E_{el} = \frac{(KEA_{Roh} + KEA_{Prod}) \cdot E_{el\%}}{g_{el}}$$

$$KEA_{BP_x} = (KEA_{Roh} + KEA_{Prod}) + E_{el} \cdot (g_{el,x} - g_{el})$$

$$THG_{BP_x} = ((KEA_{Roh} + KEA_{Prod}) - E_{el} \cdot g_{el}) \cdot K_{CO_2eqf} + E_{el} \cdot K_{CO_2eqel,x}$$

KEA [MJ/Wh]	E _{el} % [%]	THG [kgCO ₂ eq/m ²]	Anmerk.	Quellen
0,45	65	1,97	Rohstoffherstellung (inkl. Recycling)	Rydh/Sanden(2005), Sullivan/Gaines (2010)
0,42			Produktion	

Produktionsdaten Starterbatterie Bleiakкумулятор: (Cradle to Gate)

$$KEA_{StB_x} = m_{Teil-StB} \cdot KEA_{BP_x}$$

$$THG_{StB_x} = m_{Teil-StB} \cdot THG_{BP_x}$$

Anhang D (Ermittelte Produktionsdaten)

Produktionsdaten für die untersuchten Fahrzeugkomponenten. (KEA in [MJ], THG in [kgCO₂eq])

Produktionsdaten Lenkrad													
Segment		A		B		C		kSUV		F		J	
³⁴⁷	Szenario	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG
MgAl	SOA ³⁴⁸	297,98	20,43	305,73	20,55	310,61	21,28	318,15	20,98	352,18	24,85	350,69	23,46
	Min	138,30	4,77	149,84	5,09	158,50	5,99	160,48	5,26	194,86	8,88	196,16	7,71
	Max	379,04	57,62	386,36	57,49	390,81	58,02	398,98	58,43	433,65	62,37	431,49	60,89
Al	SOA	218,56	9,35	246,79	10,42	244,29	12,19	251,83	11,00	285,86	15,09	284,37	13,57
	Min	114,39	3,74	140,16	4,59	143,69	6,08	145,67	4,85	180,05	8,59	181,35	7,35
	Max	258,56	18,46	287,07	19,90	283,89	22,17	292,06	21,10	326,73	25,41	324,57	23,70
Produktionsdaten Cockpit													
Segment		A		B		C		kSUV		F		J	
³⁴⁹	Szenario	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG
MgAl	SOA	1414,26	60,89	2709,92	188,27	3059,68	211,34	1807,11	77,39	3239,72	211,72	3344,20	215,64
	Min	575,90	28,79	674,76	32,81	730,84	35,22	651,02	30,70	987,25	50,20	925,46	45,54
	Max	1677,82	96,63	3515,26	520,14	3978,28	585,95	2129,99	123,55	4046,03	538,66	4196,11	558,99
St	SOA	1414,26	60,89	1607,16	69,69	1749,66	72,75	1807,11	77,39	2177,48	98,09	2238,36	96,69
	Min	575,90	28,79	643,99	31,97	667,77	32,75	651,02	30,70	950,70	49,01	895,09	44,72
	Max	1677,82	96,63	1919,97	110,05	2039,58	110,06	2129,99	123,55	2497,97	146,57	2597,13	147,55

³⁴⁷ Werkstoff Lenkradkern

³⁴⁸ State of Art

³⁴⁹ Werkstoff Lenkradkern

Produktionsdaten Sitze													
Segment		A		B		C		KSUV		F		J	
	Szenario	KEA	THG										
Fahrersitz	SOA	1184,99	60,58	1278,65	66,45	1454,01	72,41	1267,25	65,75	1794,93	88,47	1512,96	79,22
	Min	694,13	25,67	706,31	26,71	826,42	30,62	707,59	26,63	913,96	34,04	827,67	32,17
	Max	1567,85	131,94	1736,22	147,12	1871,81	151,04	1713,68	144,55	2300,86	178,07	2034,29	169,35
Beifahrersitz	SOA	1172,43	59,61	1255,95	64,50	1302,16	65,49	1219,72	63,31	1676,03	83,17	1505,53	78,51
	Min	689,04	25,41	698,76	26,22	755,28	27,66	689,31	25,90	886,34	32,96	822,70	31,94
	Max	1542,02	129,18	1683,99	141,34	1693,70	140,04	1652,51	140,08	2178,35	171,97	2023,10	168,09
Beifahrersitz	SOA	1459,63	70,93	1845,51	88,48	1970,58	95,24	2102,14	103,17	2600,74	122,84	2417,26	123,28
	Min	873,32	31,96	1105,47	40,19	1178,49	42,78	1264,94	46,61	1425,02	52,03	1375,65	53,62
	Max	1785,76	144,30	2228,88	177,57	2405,60	193,85	2575,47	209,17	3134,85	240,69	3067,77	254,24
Produktionsdaten Scheiben													
Segment		A		B		C		KSUV		F		J	
	Szenario	KEA	THG										
Scheiben	SOA	915,68	56,04	840,17	51,80	909,21	56,31	844,73	52,34	1152,01	70,37	1240,23	75,05
	Min	661,85	39,57	607,38	36,69	657,36	39,97	610,75	37,16	832,63	49,65	896,19	52,73
	Max	944,28	81,77	866,40	75,39	937,59	81,84	871,10	76,06	1188,00	102,75	1279,00	109,93
Produktionsdaten Kabelbaum													
Segment		A		B		C		KSUV		F		J	
	Szenario	KEA	THG										
Kabelbaum	SOA	974,97	24,18	1241,22	30,78	1519,83	37,69	1396,12	34,62	2637,76	65,41	2851,12	70,70
	Min	798,82	8,73	1016,97	11,12	1245,24	13,62	1143,88	12,51	2161,19	23,63	2336,00	25,54
	Max	961,35	33,02	1223,88	42,04	1498,59	51,47	1376,61	47,28	2600,90	89,33	2811,27	96,56
Produktionsdaten ECUs													
Segment		A		B		C		KSUV		F		J	

	Szenario	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG
ECU	SOA	338,77	23,62	435,41	30,35	675,22	47,07	582,12	40,58	1339,39	93,38	1181,59	82,37
Produktionsdaten Starterbatterie													
Segment		A		B		C		kSUV		F		J	
	Szenario	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG
Starterbatterie	SOA	580,59	30,97	687,72	36,69	866,97	46,25	851,75	45,44	1147,88	61,24	1183,14	63,12
	Min	417,23	22,36	494,22	26,48	623,04	33,39	612,09	32,80	824,90	44,20	850,24	45,56
	Max	903,20	72,12	1069,87	85,43	1348,73	107,70	1325,04	105,81	1785,72	142,59	1840,58	146,97
Produktionsdaten Curtain Airbags													
Segment		A		B		C		kSUV		F		J	
	Szenario	KEA	GWP	KEA	GWP	KEA	GWP	KEA	GWP	KEA	GWP	KEA	GWP
Curtain Airbags	SOA	126,83	3,28	162,03	4,19	156,15	4,04	149,05	3,86	178,02	4,61	213,22	5,52
Produktionsdaten Ausgewählte Komponenten im Motorraum													
Segment		A		B		C		kSUV		F		J	
	Szenario	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG	KEA	THG
Komponenten im Motorraum	SOA	254,22	8,30	316,01	11,77	294,10	10,35	346,42	12,28	575,41	26,31	551,91	19,61
	Min	29,77	1,09	35,58	1,40	33,70	1,28	39,61	1,51	60,02	2,71	63,07	2,41
	Max	279,86	10,76	348,17	14,97	323,91	13,27	381,55	15,73	634,91	32,61	607,88	25,10

Tabelle 61: Produktionsdaten für die untersuchten Fahrzeugkomponenten.³⁵⁰

³⁵⁰ Eigene Darstellung.